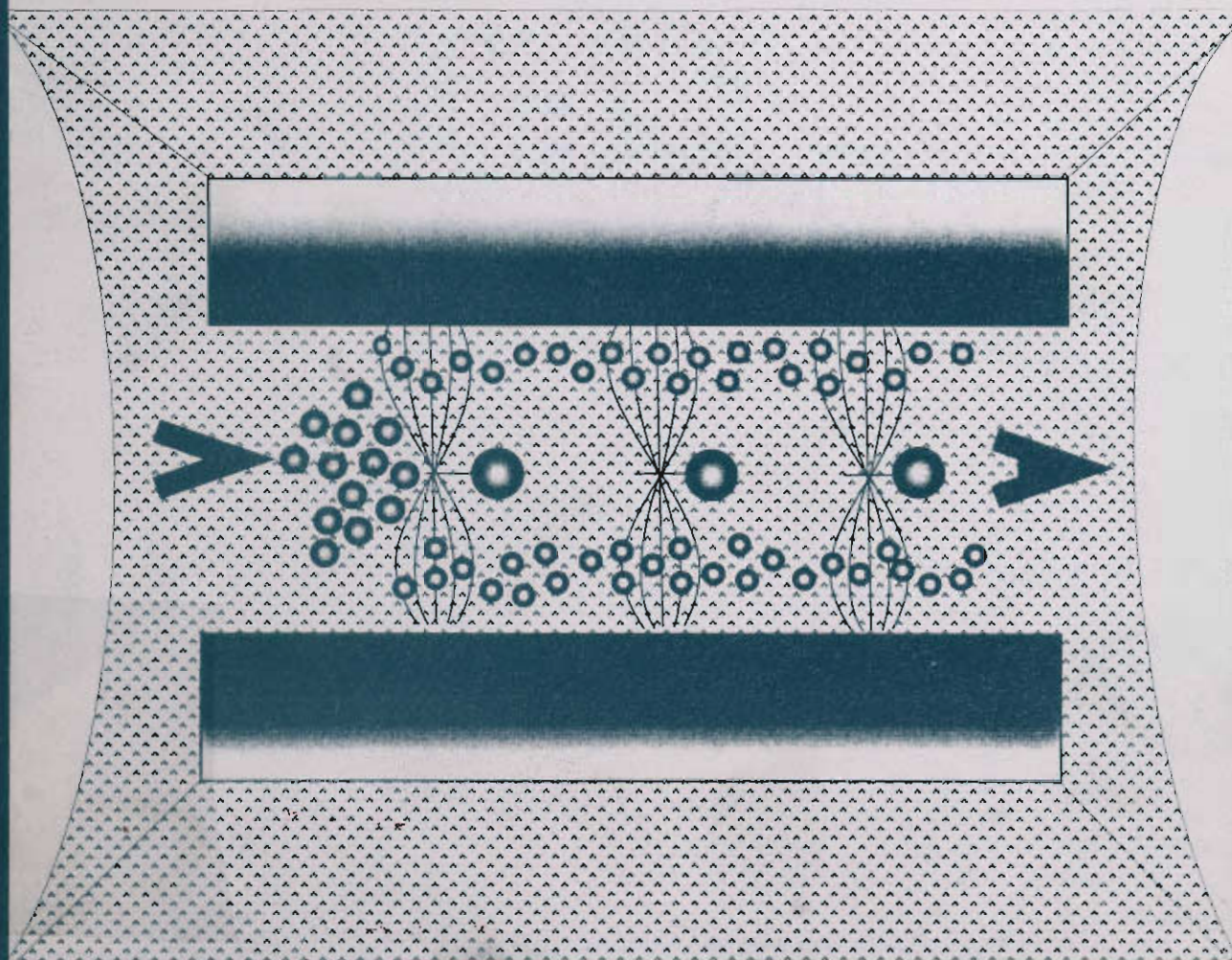


Control de partículas

Alfonso Espitia Cabrera



218040
C.B. 2893953

Control de partículas

Alfonso Espitia Cabrera



2893953

UAM-AZCAPOTZALCO

RECTOR

Mtro. Víctor Manuel Sosa Godínez

SECRETARIO

Mtro. Cristian Eduardo Leriche Guzmán

COORDINADOR GENERAL DE DESARROLLO ACADÉMICO

Mtro. Luis Soto Walls

COORDINADOR DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA

Lic. Enrique López Aguilar

JEFA DE LA SECCIÓN DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN EDITORIALES

Lic. Silvia G. Lona Perales

UAM

QC793.2

E7.55

ISBN: 970-654-948-X

© UAM-Azcapotzalco
Alfonso Espitia

Diseño de Portada.

CG Delia Cortés Martínez

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco
Av. San Pablo 180,
Col. Reynosa Tamaulipas
Deleg. Azcapotzalco,
C.P. 02200
México, D.F.

Sección de producción
y distribución editoriales
tel. 5318-9222/9223
Fax 5318-9222

1a. edición, 1991
2a. edición, 2002

Impreso en México.

CONTENIDO

TEMA	
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Definiciones básicas.	
1.2. Propiedades	
1.3. Fuentes de emisión.	
1.4. Efectos	
1.5. Marco legislativo	
2. FLUJO DE FLUIDOS	17
2.1 Definiciones básicas	
2.2 Propiedades de los fluidos	
2.3 Asentamiento dinámico de partículas	
3. CRITERIOS Y TÉCNICAS DE CONTROL	35
3.1 Razones de control	
3.2 Medidas de control	
3.3 Metodologías de control	
4. CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS	45
4.1 Descripción de partículas	
4.2 Estadística de partículas	
5. MUESTREO DE PARTÍCULAS	57
5.1 muestreo isocinético	
6. PRINCIPIOS DE CONTROL	63
6.1 Conceptos generales.	
6.2 Mecanismos de captura	
6.3 Cálculos de eficiencia	
7. EQUIPOS DE CONTROL	77
7.1 Conceptos básicos	
7.2 Descripción de equipos	
7.3 Diseño básico de equipos de control	
8. ASPECTOS ECONÓMICOS	117
8.1 Criterios económicos	
8.2 Análisis económico	

1. INTRODUCCIÓN

1.1 DEFINICIONES BÁSICAS

Existe una gran cantidad de contaminantes que se emiten diariamente a la atmósfera por vehículos automotores, fábricas, plantas de energía, sistemas de calefacción, plantas de incineración de residuos sólidos y otros. Estos contaminantes pueden clasificarse en términos generales como: gases inorgánicos (SO_2 , CO, NO_x y otros), gases orgánicos (hidrocarburos volátiles) y partículas.

Las partículas se pueden definir como un elemento discreto de un material, independientemente de su tamaño, o bien como una pequeña parte de una sustancia sólida o líquida (ISO, 13). En México existe desde 1972 un reglamento para la prevención y control de la contaminación atmosférica originada por la emisión de humos y polvos, el cual define a los humos como aquellas partículas resultantes de una combustión incompleta, componiéndose en su mayoría de carbón, cenizas y otros materiales combustibles que son visibles en la atmósfera y las partículas similares resultantes de la sublimación de los metales. Por otra parte define a el polvo, como partículas pequeñas emitidas a la atmósfera por elementos naturales o por procesos mecánicos, tales como molinos perforadoras, transporte de tierra, demoliciones y otros.(1)

Las partículas se generan por una gran variedad de mecanismos físicos y químicos y son emitidas por fuentes las cuales se clasifican como:

1. Procesos de combustión
2. Procesos industriales
3. emisiones fugitivas (no emitidas por ductos ó chimeneas)
- y 4. fuentes naturales

Las partículas se componen de sólidos y líquidos dispersos en el aire y pueden ser de la siguiente naturaleza:

Material orgánico: polen, heces fecales, restos de vegetales, material biogénico (bacterias) y otros.

Material inorgánico: compuestos de azufre, compuestos de nitrógeno, óxidos metálicos, sales y otros.

Su composición varía de acuerdo con la fuente, el área geográfica y la estación del año entre otros factores. En la atmósfera de las ciudades una composición típica podría ser: 45% sílice; 13% Fe_2O_3 ; 6% Al_2O_3 , 24% carbón; 1% cal, 1% sulfatos alcalinos y 3% caliza y el resto mezclas de vanadio, magnesio, carbonatos, cloruros alcalinos, titanio, zinc, sulfatos de metales ligeros y pesados y sustancias orgánicas y

fibras (2). como una primera aproximación partículas mayores de 10 micrometros de diámetro ($1/10000$ cm) consisten principalmente de polvo, partículas gruesas, cenizas de procesos industriales y procesos erosivos y tienden a asentarse por gravedad rápidamente, partículas menores de 10 micras y mayores de 1 micra permanecen suspendidas en el aire y consisten generalmente de humos y polvos finos, y finalmente, partículas menores de 1 micra se conocen como aerosoles.

Los aereosoles son partículas coloidales en suspensión, con un diámetro mayor que el tamaño de una molécula sin ser lo suficientemente grandes para asentarse por gravedad, los aereosoles tienden a permanecer largo tiempo en la atmósfera y son formados por alguno de los siguientes tres métodos: 1) emitidos como aerosol; 2) generados como resultado de rompimiento de grandes partículas (aerosoles por dispersión) y 3) formados por condensación de nucleación.

Los aereosoles reaccionan tanto a la luz como al calor y generalmente poseen carga eléctrica y al igual que las partículas suspendidas tienen una vida media en ese estado de segundos a varios meses y aun cuando pueden consistir de una gran variedad de sustancias, con propiedades variables, tienen tres muy importantes: propiedades de superficie; propiedades de movimiento y propiedades ópticas.(3).

Con respecto a las primeras, la más importante es la capacidad de adsorción, ya que la partícula adsorbe gases o puede funcionar como soporte ó catalizador de compuestos químicos. Con respecto a las propiedades de movimiento, las partículas con diámetros menores de 1 micra tienden a difundirse con movimiento browniano y las partículas con diámetro mayor a 1 micra tienden a sedimentarse, incrementándose esta propiedad a medida que aumenta el diámetro. Con respecto a las propiedades ópticas, las partículas menores de 0.1 micras de diámetro dispersan y absorben la luz, reduciendo la visibilidad y modificando el clima. como se observa en la siguiente tabla:(4)

DIÁMETRO (micras)	EFFECTOS
0.1	máxima nucleación en nubes con efectos posibles en cambio de clima.
0.4 - 0.8	máxima dispersión de la luz y restricción de la visibilidad (diámetros con longitud de onda iguales a la de la luz visible.
0.5 - 2.0 10.0	maxima deposición en los pulmones tendencia a sedimentación por gravedad.

1.2. PROPIEDADES

Las siguientes propiedades, son muy importantes para la caracterización y control de las partículas:

- 1) Tamaño: esta propiedad esta caracterizada por el diámetro, y es la que gobierna el comportamiento de las partículas, los métodos de medición y los mecanismos de control.
- 2) Forma: Influye en propiedades y efectos de las partículas. Por ejemplo fibras versus esferas. En general para minimizar la tensión superficial tienden a ser esfericas, si no es el caso, se describen por "diámetro equivalente"
- 3) densidad: influye en sus propiedades dinámicas y tiene una gran importancia en la distribución y en la selección de los métodos de control.

CONCENTRACIÓN

La concentración describe la cantidad de partículas en un gas de arrastre y se puede expresar de la siguiente manera:

- 1) Numérica
- 2) Másica
- 3) Volumétrica

es decir en numero de partículas, en masa o peso de las mismas, o bien en número por unidad de volumen.

A pesar de estar involucradas 2 fases (sólido-gas), tambien se pueden expresar en artes por millon, entendida como PPM_v (volumen/volumen) y PPM_m (masa/masa).

Generalmente son concentraciones pequeñas para ser expresadas en PPM. ya que por ejemplo una nube densa proveniente de una chimenea representa un 99.99% de aire, valores típicos de emisiones no controladas de una chimenea son 10,000 mg/metro cúbico de aire; 0.10 PPM (volumen/volumen) ó 8000 PPM (masa/masa).

1.3 Fuentes de emisión

Se estima que hasta el 15% del total del polvo sedimentable y hasta el 25% de las partículas en suspensión son de origen natural(2), siendo las fuentes mas importantes, desechos de suelo y rocas, fuegos forestales, volcanes y sales del océano.(5)

Con respecto a las emisiones de origen antropogénico éstas se dividen en cuatro categorías:

a) Combustión de fuentes estacionarias

- Plantas de energía
- Calderas industriales
- Sistemas de calefacción domésticos, comerciales e institucionales

b) Procesos industriales

- Plantas petroquímicas y de refinación del petróleo
- Fundición de metales
- Productos minerales
- Procesos industriales misceláneos

c) Disposición de residuos sólidos

y d) Otras fuentes significativas

- Sistemas de transporte
- fuegos forestales y quema de agricultura
- otros.

En Estados Unidos de Norteamérica (5), se ha reportado que del 35% al 50% de las emisiones antropogénicas provienen de las fuentes de combustión estacionarias, las cuales emiten cenizas volátiles, hollín y óxidos de azufre en forma de aerosoles (sulfatos), consistiendo las cenizas volátiles de óxidos inorgánico, sales y trazas de metales, el hollín por su parte consiste de hidrocarburos no quemados, y de compuestos orgánicos aromáticos policíclicos, formados en condiciones de deficiencia de oxígeno y bajas temperaturas y finalmente los óxidos de azufre son emitidos originalmente en forma gaseosa y al condensar, forman aerosoles por lo cual se clasifican también como un contaminante secundario.

Las partículas provenientes de procesos industriales, son responsables del 40% al 50% de las emisiones antropogénicas y son formadas fundamentalmente a través de los siguientes mecanismos: molienda impactación, rompimiento de líquidos, condensación y reacciones químicas. las emisiones provenientes de procesos industriales se caracterizan por poseer una gran variedad de diámetros y composición química, así por ejemplo procesos de fundición y metalurgia producen humos metálicos condensados en el rango submicrónico, la industria textil, petroquímica y de refinación del petróleo producen partículas de carbón y compuestos orgánicos condensables tales como el alquitrán.

Industrias relacionadas con la molienda (rocas, harinas, arenas, Etc.) producen partículas grandes, la industria del cemento, asfalto, celulosa y cal, producen partículas en el rango de submicrones y fuentes tales como plantas de pirolisis, vaporización de lubricantes o aceites de proceso y operaciones metalúrgicas, es decir que operan a altas temperaturas y utilizan compuestos volátiles, producen aerosoles en el rango submicrónico como resultado de la condensación de sólidos ó líquidos evaporados.

Otras emisiones relevantes en estas fuentes son las emisiones fugitivas, es decir aquellas que no se emiten a través de una chimenea o ductos, sino que son elevadas del suelo por el viento, como sería el caso de sitios de construcción, caminos en pavimentación o actividades mineras, o bien que salen a través de ventanas, puertas, venteos y fugas en equipos, ductos y bandas de transporte de materiales en operaciones industriales.

Las siguiente tabla muestra las industrias mas significativas con emisiones fugitivas:(5)

Industria alimenticia y agrícola

- Deshidratadoras de alfalfa
- Despepitadoras de algodón
- Terminales de granos
- Procesadoras de granos

Industria metalúrgica

- Metalurgia del coque
- Fundición de cobre primario
- Ferroaleaciones
- Hierro y acero
- Fundición primaria y secundaria de plomo, aluminio zinc y bronce
- Hornos de cubilote de hierro gris
- Hornos de acero

Industria de productos minerales

- Producción de concreto y asfalto
- Ladrilleras
- Industria de refractarios
- Plantas de cemento
- Industria de la cerámica y arcillas
- Industria del vidrio
- Industria calera
- Roca fosfórica
- Arenas y gravas
- Tierras diatomáceas
- Industria del carbón

Industria de productos forestales
Aserraderos
Madererías
Fabricación de muebles

1.3 EFECTOS

Desde el punto de vista de la contaminación atmosférica por partículas existen, los siguientes efectos, listados por orden de prioridad de menos a más: (6)(7)(8)(9)

1. MOLESTIAS E INSULTOS ESTÉTICOS

Concentraciones de $70-200 \text{ g/m}^3$, han sido reportadas como molestas para la población, ensuciando ropa, reduciendo visibilidad, degradando el paisaje, produciendo malos olores (adsorción de gases) y en general afectando el bienestar de la población objetiva y subjetivamente en su escala de valores. Presentándose estos efectos en rangos de horas a días, a nivel local, existiendo tecnología disponible para controlar estos efectos a costos moderados y sin repercusiones políticas relevantes si fuera implementada.

2. DAÑOS A LA PROPIEDAD

Las partículas dañan las propiedades a través del ensuciamiento, la corrosión de los mismos al transportar gases corrosivos y dañar metales o bien debido a propiedades abrasivas de las mismas partículas se ha reportado que concentraciones de $60-180 \text{ g/m}^3$, tienen efectos significativos sobre los materiales, estos efectos ocurren en periodos de horas a días, a nivel local y regional y existe tecnología disponible con un costo moderado y que su aplicación no tendría efectos políticos relevantes.

3. DAÑOS A PLANTAS Y ANIMALES

Existen diversos efectos sobre la exposición de partículas a plantas y animales, en el caso de las primeras, los más relevantes son la deposición de las partículas sobre las estomas, tapando las mismas e interrumpiendo el proceso de respiración y el de fotosíntesis y retardando el crecimiento. Además si las partículas adsorben gases corrosivos, pueden crear daños tisulares a las plantas, existen pocos datos sobre concentraciones de partículas y sus efectos, sin embargo se sabe que a concentraciones mayores de 2 g/m^3 de fluoruros en forma de partículas empiezan a aparecer efectos en las plantas.

Con respecto a los animales, existen muchos efectos que se presentan desde daños al sistema respiratorio, hasta envenenamiento de ganado, por ingestión de contaminantes específicos, como es el caso de fluoruros y arsénico, que se produce al depositarse estos sobre el forraje.

En el caso de plantas y animales, los efectos se pueden presentar de tiempos que van de horas (agudos) a meses (crónicos), en escalas locales y regionales, al ser las partículas aerotransportadas. La tecnología disponible para su control tiene un costo moderado, con dificultades para su implementación por la dispersión de los receptores y el gran número de partes involucradas.

4. DAÑOS A LA SALUD HUMANA

Aun cuando nadie muere oficialmente de contaminación de aire, ésta es un factor que agrava y desencadena, enfermedades que pueden conducir a la muerte, especialmente de grupos de alto riesgo, tales como la población infantil, de avanzada edad y de algunos que padezcan enfermedades como el asma y algunas alergias.

Debido a que las partículas tienen diversos tamaños de diámetro, estas se pueden depositar en las diferentes partes del sistema respiratorio: la región de la cabeza: nariz, boca, faringe y laringe; la región traqueobronquial que comprende los conductos que van de la laringe a los bronquiolos terminales, incluyendo la traquea y los bronquios y finalmente la región alveolar que se compone de los ductos alveolares, los sacos alveolares y el alvéolo y que es donde se lleva a cabo el intercambio de oxígeno/dióxido de carbono con el torrente sanguíneo.

Existen en el sistema respiratorio diversos mecanismos de defensa para evitar la penetración de partículas, los cuales van desde el estornudo, la barrera de los vellos en la nariz (cilios) y la secreción mucociliar. Así en la nariz el 95% de las partículas mayores de 4 micras de diámetro son removidas con el vello, permitiendo pasar todas aquellas menores de 1.2 micras, parte de las que pasan son removidas en la tráquea en donde existen cilios (pelo) los cuales se mueven hacia arriba continuamente en un movimiento de tipo peristáltico a una velocidad de 3 a 4 cm/seg, y que al atrapar partículas ya sea por ellos mismos o en combinación de absorción en la mucosa que generan las membranas, las conducen hacia la parte superior en donde se pueden remover por estornudos, tragándolas o bien sonándose la nariz. Los bronquios también tienen cilios, con un movimiento de 0.15 cm/seg, con la misma función.(9)

Las partículas restantes que no son removidas por los mecanismos descritos, se depositan en las paredes del sistema respiratorio, a través de impactación, intercepción, sedimentación, precipitación electrostática o movimiento browniano, actuando los tres primeros para partículas mayores de 2 micras y el último para aquellas en el rango submicrónico.

El sistema respiratorio procesa para un adulto normal a nivel del mar entre 10 a 20 m³ de aire al día y el área de intercambio de gases es de aproximadamente 30 m², desarrollándose en cerca de 2000 km. de capilares, esta tasa de respiración puede ser modificada en función de la actividad que desarrolle el individuo, la presión existente, la temperatura ambiente y las condiciones de humedad entre otros factores físicos, por la actividad del individuo e incluso por factores conductuales, culturales, socioeconómicos, genéticos y otros. Finalmente los niveles a los cuales se expone el receptor; la duración de la exposición; la presencia de otros contaminantes que tengan efectos sinérgicos (potenciación), antagónicos o aditivos y las condiciones ambientales (inversiones térmicas, vientos en calma y condiciones topográficas adversas) tienen un gran papel en la presencia de efectos adversos en la salud humana.

Los efectos en la salud causados por partículas básicamente se pueden clasificar como:

1. Respuestas Irritantes

Éstas se presentan como una inflamación de los tejidos generalizada y no específica y como destrucción del área de contacto con el contaminante. Exposiciones agudas del tracto respiratorio se manifiestan como:

- a. rinitis, faringitis y laringitis en el tracto respiratorio superior
- b. bronquitis y bronconeumonía en el árbol bronquial
- y c. edema y neumonía en la región alveolar

Exposiciones a largo plazo se pueden manifestar como enfisema pulmonar en la región alveolar, en inflamación crónica y en broncoconstricción con cambios en la función respiratoria.

2. Respuesta Fibrótica

Ésta se manifiesta como formación de cicatrices en los intersticios de los tejidos conectivos y las enfermedades que producen se denominan en términos generales neumoconiosis, las cuales pueden ser nodulares (silicosis); difusas (asbestosis) o de radiología alterada (siderosis).

3. Respuesta Alérgica

Ésta se manifiesta a través de la sensibilización a una exposición, con la formación de un anticuerpo inducido, que en exposiciones subsecuentes, produce una respuesta inmune o una reacción antígeno-anticuerpo, la cual puede ocurrir inmediatamente a la exposición o como una respuesta retardada, los efectos más notorios son: asma bronquial en el tracto respiratorio superior y pneumonitis (inflamación del pulmón) en la región alveolar.

4. Respuesta Mutagénica, Teratogénica y Carcinogénica

Ésta se manifiesta como mutaciones o cambios en el material genético, algunos contaminantes en forma de partícula de los cuales se sospecha que tiene estos tipos de efectos son: arsenatos de sodio; sulfatos de cadmio; sales de plomo; alquitrán; cromatos y asbestos.

Es importante resaltar que los contaminantes pueden sufrir biotransformaciones dentro del cuerpo humano, que los pueden conducir a otros órganos diferentes del sistema respiratorio y generar en consecuencia respuestas sistémicas como sería el caso del arsénico que puede pasar al sistema hematopoiético, el tracto gastrointestinal, el hígado, el riñón, el sistema endocrino y el sistema nervioso central y periférico.

Los efectos anteriores se presentan desde concentraciones de 80 g/m^3 en grupos de alto riesgo (personas mayores de 50 años) hasta concentraciones mayores de 750 g/m^3 en donde se presentan "excesos de muertes" en la población generalizada.

En el caso de las partículas, los efectos se presentan en el transcurso de horas a días en escalas locales y regionales y existe tecnología disponible para su control, con un costo moderado comparado con el costo del control de otros contaminantes y la implementación de este tipo de programas, en general tienen pocas dificultades y repercusiones políticas.

5. DAÑOS A LA GENÉTICA HUMANA O AL SISTEMA REPRODUCTIVO

Como se menciona en el punto anterior, existen este tipo de efectos en el caso de algunas sustancias químicas en forma de partículas, como es el caso de metales pesados como el arsénico, plomo, cadmio, cromo y otros como el asbesto.

6. DAÑOS A LOS ECOSISTEMAS

Los efectos más significativos en el caso de las partículas son el cambio de clima cerca del suelo, los cuales se traducen en: incrementos en la temperatura e incrementos en la carga de partículas en el suelo.

Partículas en la estratósfera modifican el balance de la energía que viene del sol, a través de la absorción y dispersión de la misma, especialmente de las radiaciones de ondas largas en forma directa y a través de la formación de nubes al condensarse partículas pequeñas en forma indirecta.

Lo anterior significa que se recibe menor cantidad de luz y calor al nivel del suelo, se estima que si se cuadruplicarán los niveles de concentración, la temperatura global disminuiría 3.5°C en un periodo de 50 a 100 años, en niveles de 100 a 150 g/m^3 , la radiación solar directa se reduce de 1/3 a 2/3 en áreas de latitud alta y media.

Este efecto se presenta a escalas regionales y globales en periodos de tiempo que involucran años y existe muy poca tecnología disponible a un costo muy alto y con pocas posibilidades de desarrollar programas de control debido a que se requieren esfuerzos de multiples instituciones y paises, por su caracter global.

1.4. Marco Legislativo

En México existe reglamentación sobre el control de emisiones de partículas a la atmósfera desde 1971, la Ley Federal Para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental, de la cual en ese mismo año, se promulgo el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica originada por la emisión de humos y polvos.

Este reglamento contiene en su capítulo II del artículo 9 al 33, diversos ordenamientos relativos a la emisión de humos y polvos, estableciendo los niveles máximos permisibles de emisión para procesos industriales específicos.

En particular los artículos 20 y 21 señalan las emisiones máximas permitidas en unidades de kg/hora y mg/m³, para operaciones, procesos ó actividades industriales, en función del peso del proceso en toneladas por hora, o el volumen del gas en la fuente en metros cúbicos, el artículo 23 contempla además el caso de fuentes múltiples de emisión y los criterios para valorarlas.

Cabe señalar, que aun cuando la primera ley ambiental ha sido sustituida en dos ocasiones, las leyes sucesivas, la Ley Federal de Protección Ambiental de 1980 y la ley actual del Equilibrio Ecológico de 1987, han especificado que este reglamento sigue vigente, con adecuaciones en cuanto a el monto de las sanciones que han sido indexadas al salario mínimo, y recientemente con la miscelánea fiscal de 1989, el monto de trámites, licencias y sanciones se han adecuado a las condiciones económicas del País.

Referencias bibliográficas

1. Reglamento para la prevención y control de la contaminación atmosférica originada por la emisión de humos y polvos. México 1971.
2. Warner p. "Análisis de los contaminantes del aire". Ed. Paraninfo, Madrid España .1981.
3. Bravo H. La contaminación del aire en México. Ed. Universo veintiuno México 1987.
4. Hesketh H. "Understanding & controlling air pollution". Lewis. U.S.A. 1972.
5. USEPA. "Control techniques for particulate emissions from stationary sources". EPA-450/3- 81-005a. U.S.A. 1982.
6. USEPA. "Air quality criteria for particulate matter and sulfur oxides. EPA-600/8-82-029abc U.S.A. 1982.
7. Miller T & Armstrong P. "Living in the environment". Wadsworth Inc. U.S.A. 1982.
8. Lippman M. "Chemical contamination in the human environment". Oxford University Press U.S.A. 1979.
9. OMS/OPS. "Criterios de salud ambiental 8. Oxidos de azufre y partículas en suspensión". Organización Mundial de la Salud. publicado en México por la Organización Panamericana de la Salud. Publicación científica no. 424. México 1982.

2. PRINCIPIO DE FLUJO DE FLUIDOS

La mecánica de fluidos tiene un gran papel en el control de la contaminación atmosférica, ya sea para control de partículas como para control de gases, por lo que es necesario conocer los conceptos fundamentales al respecto:

2.1 Definiciones básicas

Un fluido es una sustancia que no puede recibir un esfuerzo cortante sin sufrir una deformación continua el tiempo en que se aplica el esfuerzo cortante, los fluidos pueden ser líquidos o gases en donde los primeros bajo la acción de la gravedad adoptan la forma de cualquier recipiente que los contenga y casi son incompresibles con respecto a cambios de presión y temperatura, mientras que los gases tienen que estar en recipientes cerrados ó tienden a escapar a la atmósfera circundante y son muy compresibles con cambios de volumen por presión y temperatura.

Los fluidos al ser materia que fluye o esta en movimiento, se expresan matemáticamente en función de su velocidad como $V = V(x,y,z,t)$ y se clasifican de la siguiente manera:

1. Homogeneo: aquel que sus propiedades no varían de punto a punto, en un campo de fluidos.
2. Heterogeneo: en el cual sus propiedades varían en diferentes regiones en un campo de fluidos.
3. Estacionario: aquel en el cual la velocidad en cada punto no varía con el tiempo, solo con la posición.
 $V = V(x,y,z)$
4. No-estacionario: un fluido en el cual la velocidad varía con el tiempo. $V = V(t)$, variando o no con la posición.
 $V = V(x,y,z,t)$
5. Uniforme: aquel en el cual la velocidad no es función de la posición.
6. Uniforme no-estacionario: descrito como: $V = V(t)$
7. Uniforme estacionario: descrito como $V = \text{constante}$.
8. Laminar: aquel en el cual el movimiento normal a la línea de flujo ocurre por movimiento molecular, transportándose en forma de láminas.

9. Turbulento: aquel en el cual el fluido se mueve a lo largo de las líneas de flujo en movimientos moleculares y en gran escala, en donde las líneas de flujo en consecuencia son altamente variables con el tiempo y tienden a fluctuar a lo largo de una posición promedio, presentándose remolinos en el campo de fluidos.

2.2 Propiedades de los fluidos

Para efectos de control de la contaminación atmosférica, la corriente de aire y partículas se define como un aerosol, y para fines prácticos, las propiedades del fluido son las del aire, con pequeñas correcciones por el efecto de las partículas.

El aire se considera como un gas perfecto que cumple con la ley de los gases ideales:

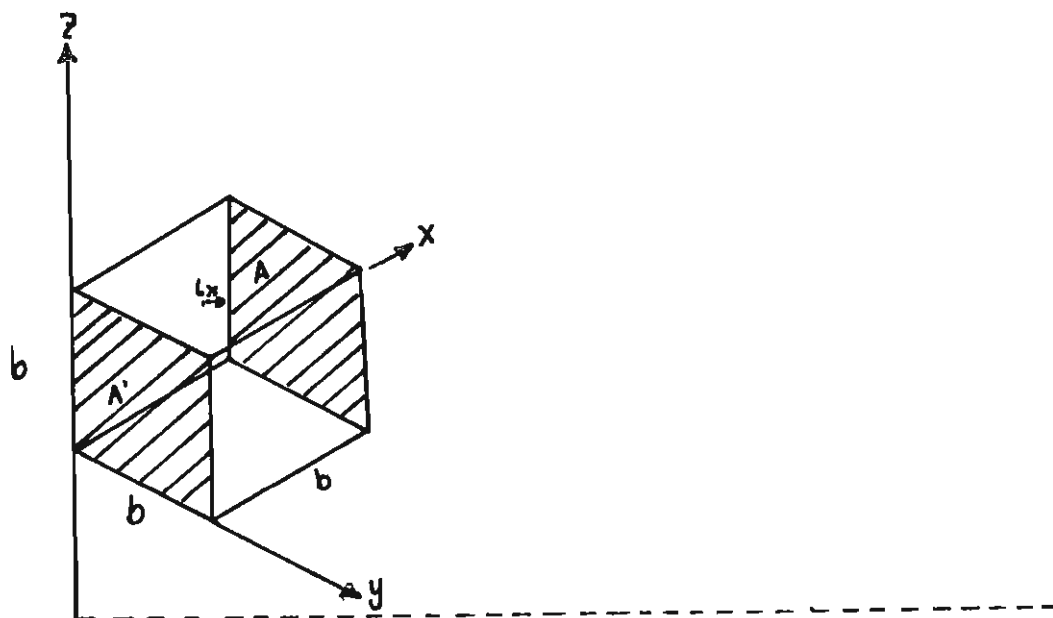
	$PV = nRuT$ (1)	en donde:	
ó			$n =$ número de moles $= m/PM$
	$PV = RT$		$m =$ masa del gas
con			$PM =$ peso molecular del gas
	$R = Ru/PM$		$P =$ presión del gas
y			$Ru =$ constante universal de los gases ($8314 \text{ J/kg.mol}^\circ\text{K}$)
	$R = Cp - Cv$		$Cp =$ calor específico a volumen constante
			$Cv =$ calor específico a presión constante.

para entender la interacción entre partículas y gas, es necesario considerar aspectos de la cinética de los gases, ya que propiedades como presión, temperatura, recorrido libre medio y viscosidad son manifestaciones del movimiento de las moléculas gaseosas.

De acuerdo con esta teoría, los gases tienen las siguientes propiedades:

1. un gran número de moléculas.
2. las moléculas son pequeñas comparadas con las distancias entre ellas
- y 3. las moléculas son esferas rígidas, que viajan en línea recta entre colisiones elásticas.

Si se toma como modelo una caja cúbica, de lado b , y se analiza el recorrido de las moléculas entre las paredes A' y A de acuerdo con la siguiente figura:



Si la caja contiene N moléculas, con masa m , una molécula tendrá un componente de velocidad C_x , paralelo al eje x , si se asume además que este componente es independiente de C_y y C_z , y que no existe interferencia con otras moléculas, nuestra molécula viajara entre las paredes A y A' , con un tiempo entre dos colisiones en A y A' de:

$$t = b/C_x$$

y tendrá un cambio de momento en cada colisión de mC_x a $m(-C_x)$, o bien:

$$mv = 2 mC_x$$

ó

$$mv/t = 2 mC_x/b/C_x = 2 mC_x^2/b$$

y de acuerdo con la segunda ley de Newton:

$$F = ma = mv/dt = 2 mC_x/b$$

y dado que

$$P = F/A$$

entonces:

$$P = F/(A + A') = F/2b^2 = 2mC_x^2/2b^3 = mC_x^2/V$$

en donde:

$$b^3 = \text{Volumen de la caja}$$

Si cada molécula ejerce la misma presión, la presión total sera:

$$P = \Sigma(mC_x^2/V)_i = m/V \Sigma(C_x^2)_i$$

y si se expresa en términos de la velocidad cuadrada promedio (C^2_x) se tiene:

$$N C^2_x = \sum (C^2_x)_i$$

o bien:

$$P = mNC^2_x/v$$

la velocidad c de cada molécula estará dada por la suma de las velocidades en los ejes x, y y z :

$$C^2 = C^2_x + C^2_y + C^2_z$$

y dado que éstas serán equivalentes, se tiene que:

$$C^2 = 3 C^2_x$$

por lo que se obtiene finalmente:

$$PV = mNC^2/3 = RT \quad (1)$$

ó bien la velocidad molecular (C_m):

$$C_m = (3RT/mN)^{1/2}$$

y si se analiza en función de una mol, en donde N es el número de Avogadro, es decir mN es igual al peso molecular del gas, se tiene:

$$C_m = (3RT)^{1/2}$$

dado que la energía cinética se define como:

$$EC = 1/2 NmC^2$$

de (1) se tiene que:

$$EC = 2/3 RT$$

Desde el punto de vista de la teoría cinética, la temperatura es una medida de la energía cinética de las moléculas, la presión proviene de la fuerza de los impactos de las moléculas sobre las paredes de un recipiente, la viscosidad representa una transferencia de momento por movimiento molecular y la difusión es una transferencia de masa molecular.

Las propiedades intensivas, es decir aquella que su valor numérico no dependen de las condiciones de fluido, sino del fluido mismo, son la densidad, el volumen específico, la viscosidad y la tensión superficial, las cuales se definen de la siguiente manera:

DENSIDAD= masa del cuerpo del fluido dividido entre su volumen

$$\rho = m/v$$

VOLUMEN ESPECÍFICO = recíproco de la densidad

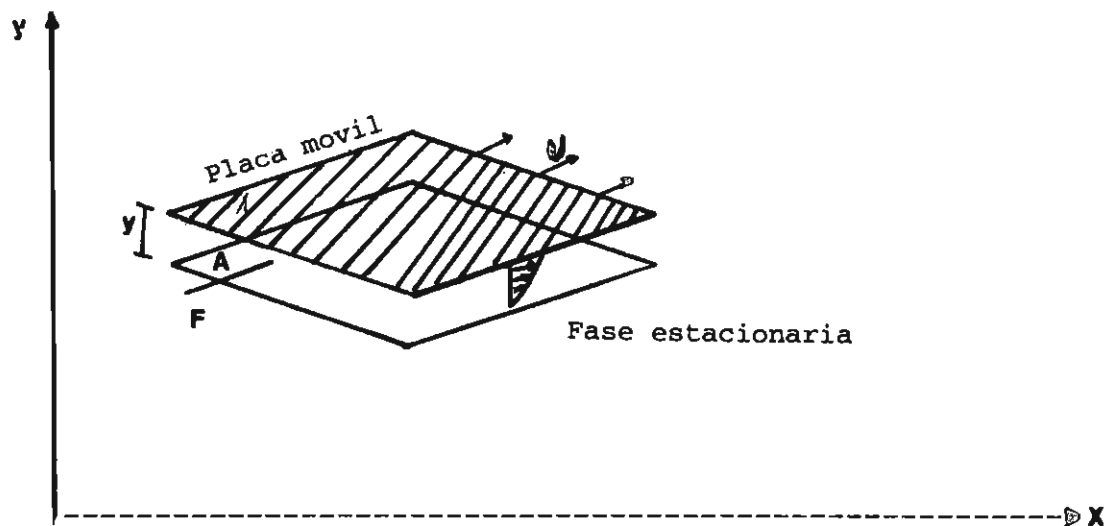
$$v = V/m$$

PESO ESPECÍFICO = peso del fluido por unidad de volumen

$$\gamma = w/V = mg/V \quad g = \text{constante gravitacional}$$

VISCOSIDAD = relación del esfuerzo cortante a gradientes de velocidad

Si se consideran 2 placas paralelas de área A , separadas una distancia y pequeña comparada con las dimensiones de la placa, y si una placa se mueve a una velocidad constante U , mientras la otra permanece quieta, el gas (ó líquido) entre las placas resiste el movimiento, de tal manera que se tiene que aplicar una fuerza F para mantener la velocidad constante, proporcional a el área de las placas y a su velocidad relativa e inversamente proporcional a la separación entre las placas:



$$F = \mu AU/y \quad (2)$$

en donde la constante de proporcionalidad se llama constante de viscosidad o simplemente viscosidad (μ), representando a nivel molecular una transferencia de momento de la capa que se mueve rápidamente a la capa que está quieta o se mueve a menor velocidad, transferencia que va acompañada de un movimiento térmico aleatorio de las moléculas viajando entre las paredes.

A nivel molecular una molécula de masa m , transfiere una cantidad de momento igual a $2m U/3y$, en las tres direcciones, y donde es el recorrido libre medio, o la distancia que viaja una molécula entre choque y choque.

Si el número total de moléculas cruzando en las dos direcciones una área A paralela a las placas es $2(nC/4)$, entonces el transporte total de momento por unidad de tiempo será:

$$nmC \quad AU/3y$$

y será igual a la fuerza de resistencia friccional, por lo que la viscosidad también se puede expresar como:

$$\mu = 1/3 nmC = 1/3 \eta C$$

o bien dado que el recorrido libre medio es igual a $1/\sqrt{2} n\pi d_m^2$ en donde d_m es el diámetro de colisión. siendo el valor del recorrido

libre medio para el aire a condiciones estandar (1 atm. y 20°C) de 0.066 m. y $C = (8kT/\pi m)^{1/2} = (8RT/\pi M)^{1/2}$; en donde k es igual a la

constante de Boltzmann ($k = R/Na = 1.38 \times 10^{-16}$ dinas.cm/ $^\circ\text{K}$)

combinando estas ecuaciones, la viscosidad se expresa como:

$$\mu = 2(mkT)^{1/2} / 3\pi^{3/2} d_m^2$$

Es decir la viscosidad depende solo de las constantes moléculares y la temperatura y se incrementa en el caso de gases con el incremento en temperatura, siendo independiente de la presión, estableciéndose la dependencia de la temperatura de acuerdo con la ecuación anterior.

Número de Reynolds

El número de Reynolds, es un número adimensional que caracteriza el flujo de un fluido a través de una tubería o alrededor de un obstáculo y es muy importante para entender las propiedades aerodinámicas de un aerosol, teniendo las siguientes propiedades:

1. es proporcional a la relación entre fuerzas inerciales y fuerzas friccionales ó viscosas actuando sobre cada elemento del fluido y determinando cual ecuación de resistencia al flujo es correcta en una situación dada.
2. es un índice del régimen de flujo y de acuerdo con su valor numérico este es turbulento ó laminar
3. Es aplicable sólo en condiciones geométricas similares

La fuerza friccional se define de acuerdo con la ecuación:

$$F_f = A \frac{dU}{dy} \propto a \quad l^2 \frac{dU}{dl}$$

en donde l es una característica de longitud del fluido y dU/dy es el gradiente de velocidad en la región del elemento del fluido.

La fuerza inercial por su parte se define como:

$$F_i = m a = m \frac{d'U}{dt} = l^3 U \frac{dU}{dx} \text{ en flujo estacionario}$$

en donde $d'U/dt$ es la aceleración.

combinando ambas ecuaciones:

$$Re = F_i/F_f = l^3 U / \mu l^2 = Ul / \mu$$

Si se considera un objeto, y la velocidad V relativa entre el fluido y el objeto, proporcional a U , con la característica lineal del objeto el diámetro d , el número de Reynolds se puede expresar como:

$$Re = Vd / \mu$$

Numéricamente el flujo laminar ocurre cuando el número de Reynolds es menor que 2000 para tubos circulares y menor de 0.1 para partículas asentándose en un fluido (aire). y es turbulento para valores de Reynolds de 2500 para tubería circular y 1000 para partículas asentándose en un fluido, siendo de transición en los valores intermedios de acuerdo con la siguiente tabla:

	partículas	flujo
flujo laminar	No. Re < 0.1	No. Re < 2000
flujo turbulento	No Re . 1000	No Re > 4000
flujo de transición	0.1 < No Re < 1000	2000 < No Re < 4000

Otra propiedad que puede ser importante es la obtención del peso molecular en el caso de mezclas de gases o un aerosol. obteniéndose a través de la siguiente ecuación:

$$M_{mezcla} = \sum M_x B_x \quad \text{para} \quad \begin{array}{l} x = \text{componente} \\ B = \text{proporción en volumen} \end{array}$$

La siguiente tabla muestra algunas propiedades del aire a presión estandar de 1 atm.

	temperatura		
	0 °C	20 °C	
viscosidad	1.72×10^{-4}	1.81×10^{-4}	Poise (dinas.s/cm ²)
densidad	1.29×10^{-3}	1.20×10^{-3}	g/cm ³

2.3. ASENTAMIENTO DINÁMICO DE PARTÍCULAS

El movimiento mas frecuente de partículas, es el movimiento estacionario recto, resultado de la acción de 2 fuerzas:

- Una fuerza externa tal como: la gravedad, una fuerza eléctrica, un gradiente de: concentración, presión, temperatura, Etc y
- La resistencia del gas al movimiento de la partícula, el cual depende de la velocidad relativa entre la partícula y el gas.

En la mayoría de los casos, al ser acelerado un aerosol, alcanza casi instantaneamente una velocidad constante, que es fácilmente analizada por el movimiento uniforme.

Newton estableció que la resistencia del aire a el movimiento de partículas es el resultado de la aceleración del aire que tiene que ser empujado hacia los lados para permitir el paso de la partícula.

Si consideramos una partícula esférica de diámetro d, ésta empujará por unidad de tiempo t, un volumen de gas igual a el área proyectada de la esfera, multiplicada por su velocidad v, el cual tendrá una masa m de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$F = mg = \rho \pi/4 d^2 v$$

m = cantidad de masa por unida de tiempo (flujo másico) [masa/seg]

$\pi/4 d^2$ = área de una esfera

v = velocidad de la partícula

g = constante gravitacional

ρ = densidad

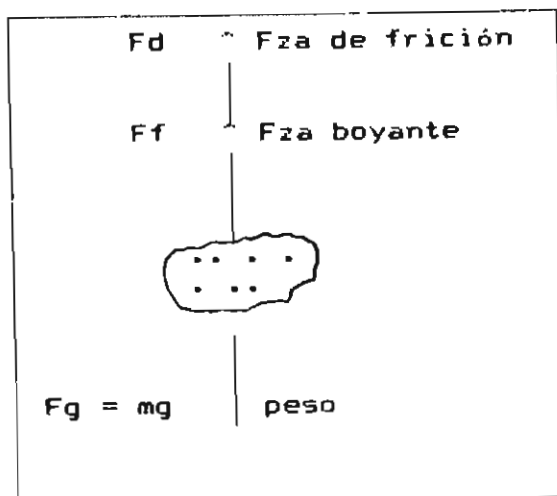
ó bien; $m = \rho g \pi/4 d^2 v$

la aceleración de el gas es proporcional a la velocidad relativa entre el gas y la partícula.

$$mv/t = \text{cambio de momento/unidad de tiempo} \propto mv = g \pi/4 d^2 v^2$$

Velocidad de asentamiento

Cuando cae una partícula bajo la fuerza de gravedad en el aire, esta sometida a las siguientes fuerzas:



F_f = fuerzas flotantes ó boyantes

$F_g = mg$ = fuerza del peso

F_d = fuerza de fricción

en donde:

$$F_{total} = F_d + F_g + F_f$$

cuando la partícula alcanza el equilibrio:

$$F_d = F_g = mg$$

$$\text{ó } 3\pi\mu v_d = (p - g) \pi d^3 g / 6 \quad \begin{array}{l} p = \text{densidad de la partícula} \\ g = \text{densidad del gas} \end{array}$$

y dado que

$$p \gg g$$

$$\text{entonces: } v = \frac{p d^3 g}{18 \pi \mu d} = \frac{p d^2 g}{18 \pi \mu} \quad \text{para } d > 1 \text{ y } Re < 1$$

ó bien:

$$v = VTS = \frac{p d^2 g}{18 \pi \mu} \quad \dots (1) \quad \begin{array}{l} VTS = \text{velocidad terminal de} \\ \text{asentamiento} \end{array}$$

en donde se observa que:

$$VTS \propto d^2 \quad \text{y si } d \text{ aumenta, entonces } VTS \text{ aumenta.}$$

Los aerosoles alcanzan la velocidad terminal de asentamiento casi instantáneamente y VTS es un gran indicador para caracterizar el movimiento de las partículas en la mayoría de los casos.

La ecuación anterior no se puede usar para partículas menores de una micra de diámetro sin ser corregidas.

Para el caso de esferas de densidad unitaria a condiciones estandard (1 atmosfera de presión y 25°C)

$$VTS = 0.003 d^2 \quad \text{para } 1 < d < 100 \mu$$

$$\text{con } VTS \text{ [cm/s]} \\ d \text{ [\mu]}$$

Si la fuerza conductora fuera diferente a la gravedad, en condiciones de equilibrio se obtienen ecuaciones similares.

para el caso de una fuerza centrífuga:

$$VTC = p d^2 Ac / 18 \mu \quad \text{con } Ac = \text{aceleración centrífuga} \\ \text{al ser aplicada una} \\ \text{velocidad tangencial } Vt \\ \text{con un radio de} \\ \text{movimiento } R$$

y:

$$Ac = Vt^2/R$$

De acuerdo con la ley de Stokes, la fuerza resistente es directamente proporcional a la velocidad

$$Fd = V \quad \text{ó bien} \quad Fd = BV \quad \text{para } d > 1$$

$$\text{con } B = V/Fd = V / 3\pi \mu V d = 1 / 3\pi \mu d$$

en donde: B = movilidad / unidad de fuerza B[cm/s/dinas] ó [s/g]

$$\text{y: } VTS = Fg B$$

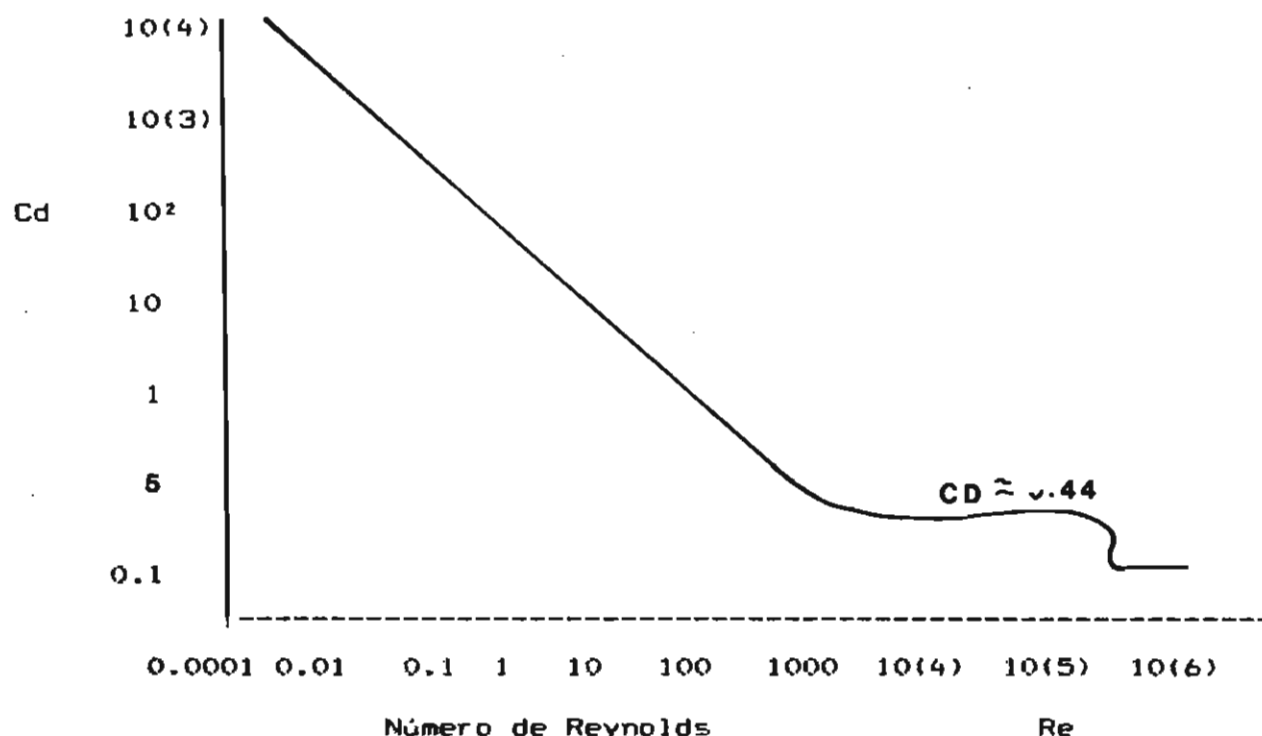
Factor de corrección

La ley de Stokes asume que la velocidad relativa entre el gas y la partícula en la superficie de esta es cero, lo cual no es válido para partículas en el rango submicrónico, cuyo movimiento se acerca al del recorrido libre medio del gas, tales partículas asientan más rápidamente que como predice la ley.

Por definición el cambio de momento es igual a la fuerza requerida para mover una esfera a través del gas (2a ley de Newton) la cual se denomina fuerza de resistencia o fuerza de arrastre Fd

$$Fd = K \cdot g \cdot \pi/4 \cdot d^2 \cdot V^2$$

en donde K es una constante de proporcionalidad, la cual tendrá diferentes valores en función de la velocidad y la forma de la partícula ó bien en función del número de Reynolds, de acuerdo con la gráfica



La ecuación anterior para $Re > 1000$, al sustituir K por C_d (coeficiente de arrastre) se puede escribir como:

$$F_d = C_d \pi/8 \rho d^2 V^2 \quad \text{ECUACIÓN GENERAL DE RESISTENCIA DE NEWTON}$$

estas ecuaciones se obtienen sólo en el caso en que la inercia del gas domine y sólo es válida para números de Reynolds altos en donde las FUERZAS INERCIALES DOMINAN A LAS FUERZAS VISCOSAS ($Re > 1000$)

Para:

$$Re > 1000 \quad C_d = 0.44$$

para: $1 < Re < 1000$ se debe calcular C_d con la ecuación:

$$C_d = 24/Re (1 + Re^{2/3}/6) \quad \text{que tiene un error de 2\% para } 3 < Re < 400 \text{ y de 10\% para } 400 < Re < 1000$$

Cuando las fuerzas viscosas dominan, es decir cuando tenemos Reynolds bajos, flujo laminar y diámetros pequeños de los aerosoles, el movimiento de los mismos obedece a la ley de Stokes, la cual se aplica cuando sobre un elemento del fluido actúan FUERZAS EJERCIDAS POR EL CUERPO, PRESIÓN Y FUERZAS VISCOSAS.

Se asume que las fuerzas inerciales son despreciables comparadas con las viscosas, que los fluidos son incompresibles, no existen paredes u otras partículas cercanas a la que se analiza, el movimiento es constante, la partícula es esférica y la velocidad del fluido en la superficie de la partícula es cero.

Stokes encontró que la fuerza neta que actúa sobre la partícula por la acción de un fluido se obtiene al integrar las fuerzas normales y tangenciales sobre la superficie de la partícula, actuando las dos fuerzas en la dirección opuesta al movimiento de la partícula.

$$\begin{array}{lcl} \text{v} & & \text{<-----fuerza de la forma} = F_u = \pi \mu V d \\ \text{----->} & 0 & \\ & & \text{<-----fuerza friccional} = F_f = 2\pi \mu V d \end{array}$$

$$\text{y fuerza total} = F_d = \pi \mu V d + 2 \pi \mu V d = 3\pi\mu V d$$

$$F_d = 3\pi\mu V d \quad \text{LEY DE STOKES}$$

esta ley se aplica a $Re < 1.0$ y se puede reescribir como:

$$F_d = 3\pi\mu V d = C_d \pi/8 \rho V^2 d^2 \quad \text{para } Re < 1.0$$

resolviendo para C_d se obtiene:

$$C_d = 24 \mu / \rho V d = 24/Re \quad \text{aplicable para la sección recta de la gráfica.}$$

debido a que existe un RESBALAMIENTO en la superficie de la partícula dado que son de un tamaño similar a las moléculas del gas, Cunningham desarrollo un factor de corrección para la ecuación:

$$F_d = 3\pi \mu V d / C_e \quad \begin{array}{l} C_e = \text{factor de corrección de Cunningham} \\ C_e > 1.0 \end{array}$$

y:

$$C_e = 1 + 2.52 \lambda / d \quad \lambda = \text{recorrido libre medio}$$

$$\text{válido para } 0.1 < d < 1$$

para la región $0.01 < d < 0.1$

$$C_e = 1 + \lambda / d [2.519 + 0.800 E (-0.55 d / \lambda)]$$

y aplicando este factor en la ecuación de velocidad terminal se obtiene:

$$V_{TS} = \rho d^2 g / 18 \mu C_e$$

Cuando las partículas no son esféricas (fibras, cristales, etc.) se aplica otro factor de corrección llamado FACTOR DINÁMICO DE FORMA X

en donde: $X = F_d / 3\pi \mu V_{de}$ de = diámetro equivalente a una esfera con el mismo volumen

X es la relación entre la fuerza de resistencia de una partícula no esférica a la fuerza de resistencia de una esfera con el mismo volumen y velocidad.

y $F_d = 3\pi \mu V_{de} X$

ó $V_{TS} = \rho de^2 g / 18 \mu X$

2.4 ACELERACIÓN DE PARTÍCULAS

Cuando una partícula se mueve en la región de Stokes, la velocidad terminal que alcanza es directamente proporcional a la fuerza externa que actúa sobre la partícula, considerando a la constante de proporcionalidad de esta relación como la movilidad mecánica

velocidad \propto Fuerza actuante

ó bien: $V = B F$ B = movilidad mecánica

si F es la fuerza de gravedad:

$V_{TS} = B mg$ mg = fuerza de gravedad

el producto $m B$ se conoce como el TIEMPO DE RELAJACIÓN τ

$m B = \tau$ ó bien $V_{TS} = \tau g$

y caracteriza al tiempo que se requiere para que una partícula AJUSTE O RELAJE su velocidad a las nuevas condiciones de fuerza

τ depende de la masa y la movilidad y no se ve afectado por las características de la fuerza actuante

$\tau = f(\mu \text{ corrección por resbalamiento}, T_g \text{ y } \rho)$

τ sólo se aplica a la región de Stokes ($Re < 1$)

$\tau = m B = \rho \pi/4 D^3 (C_e / 3\pi\mu d) = \rho d^2 C_e / 18\mu$

o bien: $\tau \propto d^2$

de acuerdo con lo anterior:

$$V_{TS} = \int g$$

o para cualquier fuerza externa constante F sobre una partícula:

$$V_{TS} = \int F/m$$

En un campo en donde las partículas son aceleradas, aquellas con velocidad cero alcanzan rápidamente su velocidad terminal y de acuerdo con la 2a ley de Newton

$$\Sigma F = d [mV(t)] / dt \quad V(t) = \text{velocidad instantánea}$$

si $m = \text{cte}$

$$\Sigma F = m dV(t) / dt = mA$$

Dado que la aceleración de una partícula en el aire es NO INERCIAL, la fuerza de arrastre F_g se obtiene de acuerdo con la ley de Stokes, si se asume que la fuerza de gravedad es positiva:

$$\Sigma F = F_g - F_d = mg - 3\pi\mu V(t) d = m dV(t)/dt$$

multiplicando por B ambos lados

$$mBg - 3\pi\mu V(t) Bd = mB dV(t)/dt$$

sustituyendo \int y dado que $B = 1/3\pi\mu d$

se tiene:

$$\int g - V(t) = \int dV(t)/dt$$

y ya que $V_{TS} = \int g$

$$dt/\int = dV(t)/V_{TS} - V(t)$$

integrando:

$$dt/\int = dV(t)/V_{TS} - V(t) = t/\int = -\ln [V_{TS} - V(t)] + \ln V_{TS}$$

multiplicando por -1 y sacando exponenciales

$$e^{-t/\int} = V_{TS} - V(t) / V_{TS}$$

o bien:

$$V(t) = V_{TS} (1 - e^{-t/\int})$$

escrita en forma general:

$$V(t) = V_f - (V_f - V_o) e^{-t/\tau}$$

V_f = velocidad final = VTS

V_o = velocidad inicial (a $t = 0$)

en aire quieto en un campo gravitacional, las siguientes relaciones son válidas:

$$V(t) = 63\% \text{ VTS para } t = 1 \tau$$

$$V(t) = 95\% \text{ VTS para } t = 3 \tau$$

considerando que generalmente VTS se alcanza con $t = 3\tau$ y permanece constante después.

cuando V_o NO ES CERO puede ocurrir lo siguiente

- 1) si V y V_o están en la misma dirección y $V > V_o$, la partícula se acelera
- 2) si $V < V_o$ la partícula se desacelera y:
- 3) si V y V_o están en dirección opuesta la partícula se desacelera, cambia a la dirección opuesta y se acelera

en todos los casos el tiempo requerido para alcanzar VTS es 3τ y es INDEPENDIENTE de la magnitud de la velocidad y sus diferencias.

Si la fuerza externa NO ES CONSTANTE y si cambia por un factor $1/e$ en un tiempo t_c en donde $t_c \gg \tau$, se puede considerar que la partícula ajusta su velocidad INSTANTÁNEAMENTE o bien:

$$V(t) = \int F(t) / m \quad \text{para } \tau \ll t_c$$

lo anterior puede aplicarse en el caso de un ciclón

si se reemplaza $V(t)$ por dx/dt y se integra la ecuación se obtiene

$$X(t) = V_f t - (V_f - V_o) \tau (1 - e^{-t/\tau})$$

con lo que se calcula la POSICIÓN de la partícula (X) en cualquier tiempo t .

cuando $V_f = 0$ y $t \gg \tau$ se obtiene:

$$S = V_o \tau \quad \text{ya que } e^{-\alpha} = 0$$

S = distancia de paro o rango inercial
(distancia total desplazada)

S representa un momento efectivo, el cual disminuye hasta cero por la fricción del aire sobre una distancia igual a la de paro.

dado que $\int = mB$

$$S = BmV_0$$

en el caso en donde la corriente de aire cambia en 90 grados, S representa la distancia en la que la partícula continua viajando y se puede considerar como una medida de la PERSISTENCIA con la cual una partícula continua viajando en su dirección original.

NÚMERO DE STOKES Y MOVIMIENTO CURVILÍNEO

Una partícula tiene un movimiento curvilíneo cuando sigue una curva en lugar de un movimiento en línea recta, el cual puede resultar debido a:

- 1) cuando una partícula esta sometida a fuerzas en 2 o más ejes, o si una o más fuerzas varían con el tiempo o posición produciendo una aceleración y:
- 2) cuando el aire convergente cambia de dirección o pasa alrededor de un obstáculo, produciéndose un movimiento curvilíneo

En el primer caso se analiza la situación separando las fuerzas en X y Y y analizando cada componente separadamente, en la región de Stokes, las fuerzas F_x , F_y , F_z son independientes y separables, de modo tal que el movimiento de una partícula en X, no afecta la fuerza resistente en Y o Z.

Si $Re > 1$ en algún eje, se afectan los ejes restantes y si $Re < 1$, las ecuaciones en X y Y son:

$$X(t) = V_0 \int (1 - e^{-t/\int})$$

$$Y(t) = VTS t - VTS \int (1 - e^{-t/\int})$$

al resolver estas ecuaciones para diversos valores de t se obtiene una curva.

En el segundo caso, el análisis es más complicado y depende del movimiento del fluido, la forma del obstáculo y las fuerzas mismas, resolviéndose estos casos analíticamente por geometría.

El movimiento curvilíneo se caracteriza por el número adimensional de Stokes (STK), que es la relación entre la distancia de paro de una partícula y una dimensión característica de el obstáculo

Para el caso de un cilindro de diámetro d_c el número de Stokes se define como:

$$STK = S/dc = \int Vo / dc$$

S = distancia de paro
 \int = tiempo de relajación
 Vo = velocidad sin sufrir
 disturbios
 dc = diámetro del cilindro

El número de Stokes se presenta como la relación entre la PERSISTENCIA de la partícula con respecto al tamaño del obstáculo.

Cuando STK ----> 0 , las partículas siguen la línea de flujo y si STK aumenta, la partícula resiste los cambios de dirección del gas de arrastre.

El número de Stokes se usa para caracterizar la impactación inercial y la transferencia inercial de partículas sobre superficies.

Referencias bibliográficas sugeridas

- Crawford M. "Air pollution control theory". Mc Graw Hill U.S.A. 1976.
- Hinds W. "Aerosol technology" John Wiley & Sons U.S.A. 1982
- Licht W. "Air pollution control engineering". Basic calculations for particulate collection. Marcel Dekker, Inc. U.S.A. 1980.
- US EPA "Control of particulate emissions". Manual training course 413. Environment Protection Agency U.S.A. 1973.

3. CRITERIOS Y TÉCNICAS DE CONTROL

3.1. azones de control

Desde el punto de vista de las fuentes de emisión, el control de la contaminación del aire por partículas, se lleva a cabo para:

1. Cumplir con la legislación existente.
2. Recuperar material valioso o limpiar el aire para utilizarlo como insumo ó como condición del proceso.
3. Mantener buenas relaciones con la comunidad circundante y con los trabajadores.

En el primer caso, como se mencionó en el capítulo 1, en México el control de partículas esta reglamentado y existen normas de emisión desde 1971. artículo 20 y 21 del reglamento vigente.

En relación a la recuperación de material valioso en las emisiones, éste puede servir para:

- 1) obtener ganancias a través de un producto comercializable y
- 2) reducir los costos del control de las emisiones

Algunos ejemplos de material valioso al ser recuperados son: harinas de molinos; material abrasivo de procesos de acabado metálico; menas de quebrado y molienda en minas; cemento de hornos de calcinación; azúcar de secadores y enfriadores; negro de humo que sirve como materia prima en procesos; gomas de bombos en la industria del chicle; sustancias químicas pulverizadas y otros.

Con respecto a las relaciones con la comunidad y trabajadores, el objetivo es eliminar molestias a la población o evitar reducir su calidad de vida por ensuciamiento de materiales, reducción de la visibilidad, deterioro del paisaje o daños a la salud.

Finalmente dentro del interior de la planta, el mantener las áreas limpias contribuye a:

- 1) mantenimiento adecuado de equipos y maquinaria
- 2) reducción de accidentes y ausentismo y
- 3) creación de un ambiente de trabajo adecuado.

3.2 Medidas de control

El control puede ser:

- 1) Preventivo.

y 2) Correctivo

El control preventivo siempre será más eficaz y más económico, ya que puede ahorrar:

- a) Energía utilizada en el control
- b) Costo del equipo de control
- c) costo de operación y mantenimiento y
- d) costo de la disposición del material colectado

Por regla general el control correctivo debe de ser considerado como la última opción, sólo utilizado cuando las técnicas de control preventivo no han tenido éxito.

El control preventivo se obtiene a través de :

1. Modificación del proceso por

- a) Cambios en el proceso: cambio en el proceso de fusión, tipo de reacción, Etc.
- b) Control del proceso: Control de la temperatura, alimentación presión, control de la reacción, etc.
- c) Modificación en el equipo de trabajo:
Sistemas de transporte de materiales, equipos herméticos sistemas de enfriamiento, Etc.
- d) Cambios en los procedimientos de trabajo.
Adiestramiento del personal para operar en las condiciones óptimas de operación, con emisiones mínimas, o bien operar con los sistemas preventivos de control.

2. Cambios en los materiales de proceso.

Sustitución de materiales que producen contaminantes más fáciles de controlar o que generan menos emisiones, como por ejemplo, la sustitución de combustibles con menor cantidad de azufre y que generan menores cantidades de sulfatos en forma de partículas en procesos de combustión.

3. Dispersión de contaminantes.

Para efectos de reducir los niveles de concentración de contaminantes a nivel local, se usan chimeneas altas, con lo cual la misma cantidad de contaminantes se dispersa en áreas mas grandes, reduciendo las concentraciones al nivel del suelo al distribuirse en superficies más grandes.

Si no es posible implementar control preventivo, entonces será necesario instalar equipos de control de emisiones, los cuales se deben de seleccionar, de acuerdo con los siguientes puntos:

1. Establecimiento de objetivos de control.
Determinación de los niveles permisibles de emisión, de acuerdo con la legislación vigente, y las necesidades de la empresa y en relación con la comunidad circundante.
2. Selección del equipo de control.
Existe una gran variedad de equipo de control, cuya selección dependerá de las condiciones específicas de cada problema, de factores económicos e incluso de la disponibilidad comercial del equipo.

El equipo de control se clasifica en:

- a) Colectores secos
 - Cámaras de asentamiento
 - Reparadores centrífugos
 - .dinámicos
 - .ciclones: alta, media y baja eficiencia
 - Reparadores inerciales
 - Filtros de bolsas
 - Precipitadores electrostáticos
- b) Colectores húmedos
 - Torres de aspersión
 - Lavador tipo venturi

Factores para selección y diseño del equipo

A. Propiedades del gas de arrastre:

- temperatura
- presión
- humedad
- densidad
- viscosidad
- punto de rocío
- conductividad
- corrosividad
- toxicidad
- inflamabilidad

B. Propiedades de la partícula

- tamaño y distribución
- forma
- densidad
- adhesividad y tendencia a aglomerarse
- higroscopicidad
- conductividad

- corrosividad
- inflamabilidad
- toxicidad
- abrasividad
- tendencia a flotar

C. Necesidades de acondicionamiento

- a) gas de arrastre: humidificación, enfriamiento, calentamiento
- b) partículas: condensación, floculación, deposición, tratamiento
- c) superficie de colección: impregnación de sustancias viscosas, enfriamiento, calentamiento

D. Factores del proceso

- a) gasto volumétrico
 - velocidad
 - tiempo de retención
- b) Concentración
- c) Caída de presión permisible

E. Consideraciones de operación

- 1) mantenimiento
- 2) continuidad o intermitencia
- 3) seguridad
 - toxicidad
 - explosividad e inflamabilidad
- 4) Disposición de residuos y del material colectado
 - recuperación de productos
 - disposición de desechos

F. Construcción e instalación

- 1) espacio
- 2) disponibilidad de requerimientos
 - agua
 - vapor
 - aire comprimido
 - electricidad

3) equipo auxiliar

- ventilador o compresor
- bombas
- motores
- equipo de vibración
- transporte
- puertos de limpieza
- acceso
- subestación eléctrica
- alarmas
- tanques
- válvulas
- deflectores

4) Material de construcción

- protección contra el clima
- aislamiento
- caída de presión
- temperatura
- corrosión
- erosión

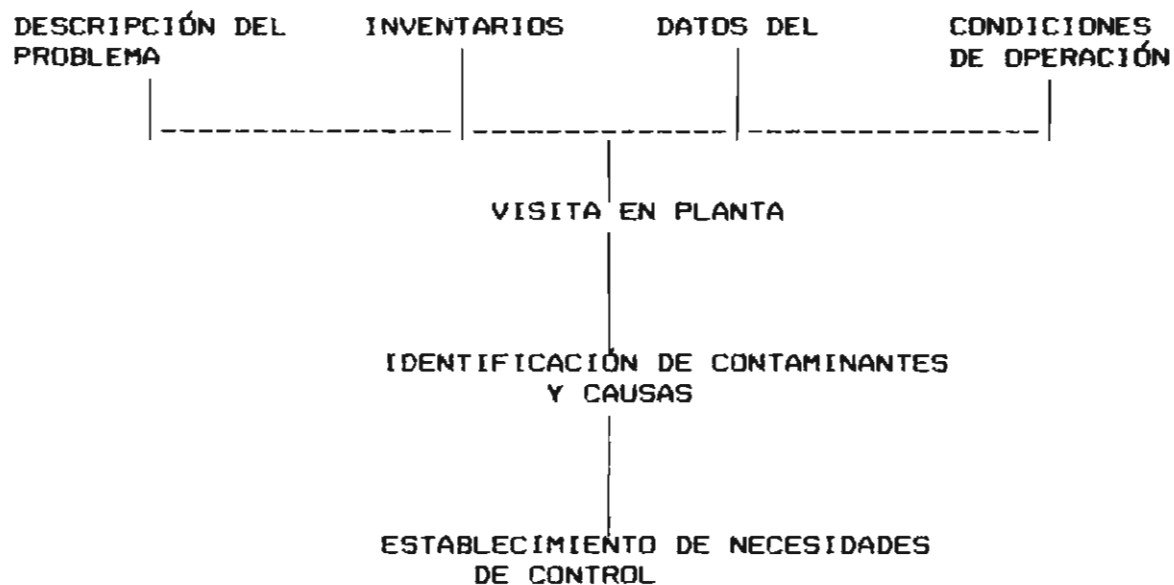
3.3 Metodología de control

Como metodología mínima de control se recomienda lo siguiente:

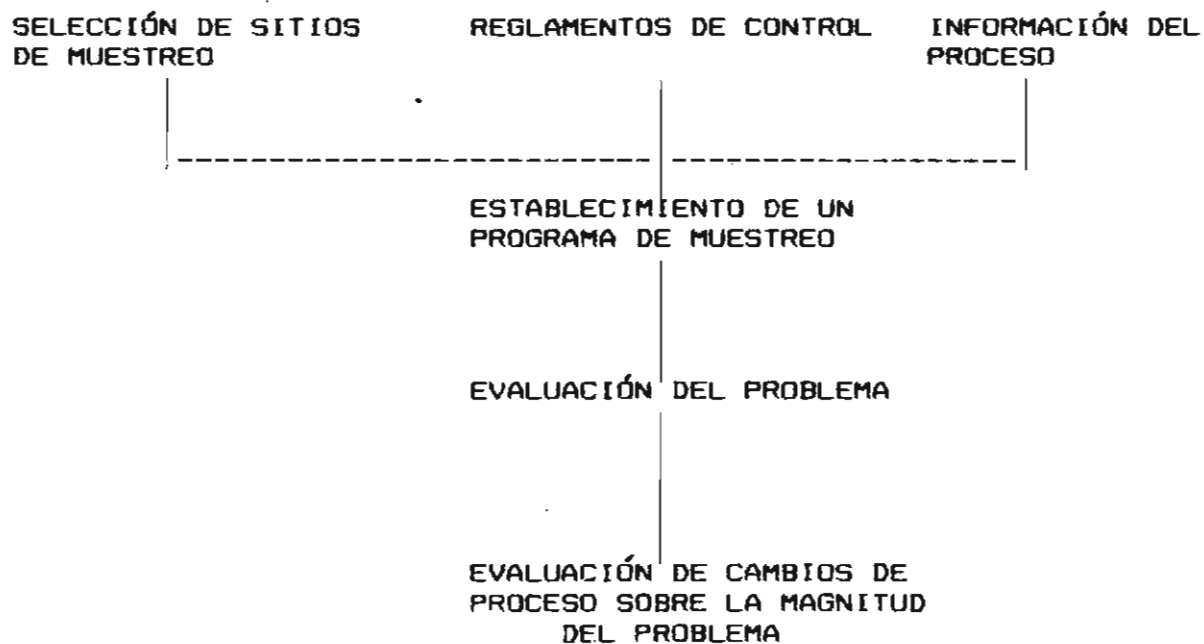
- 1) Definición del problema
- 2) muestreo y evaluación del problema
- 3) Estudios de ingeniería
- 4) Evaluación del equipo de control potencial
- 5) Evaluación económica

Cada uno de los pasos anteriores pueden ser resumidos a través de los siguientes diagramas:

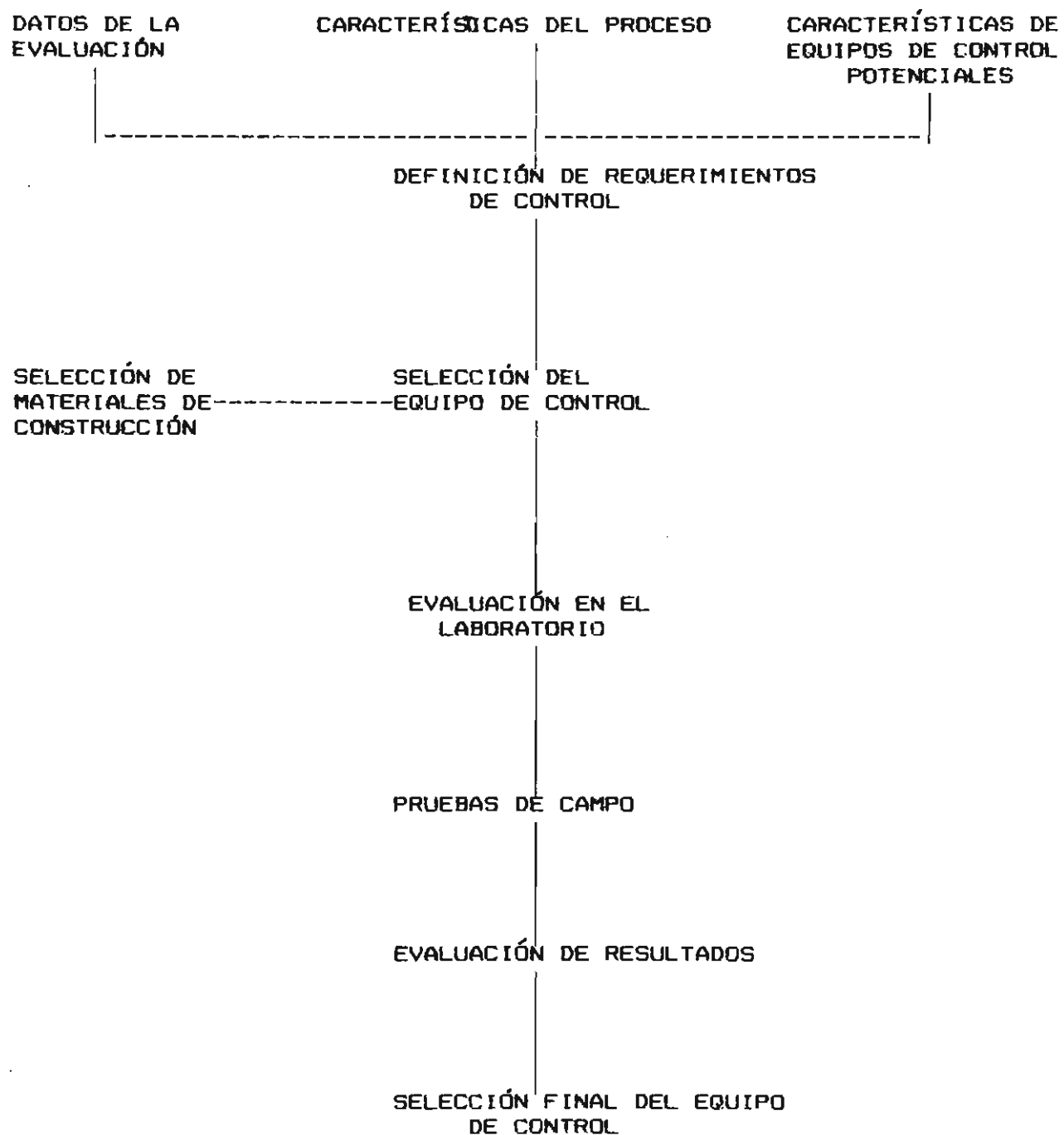
1. Definición del problema



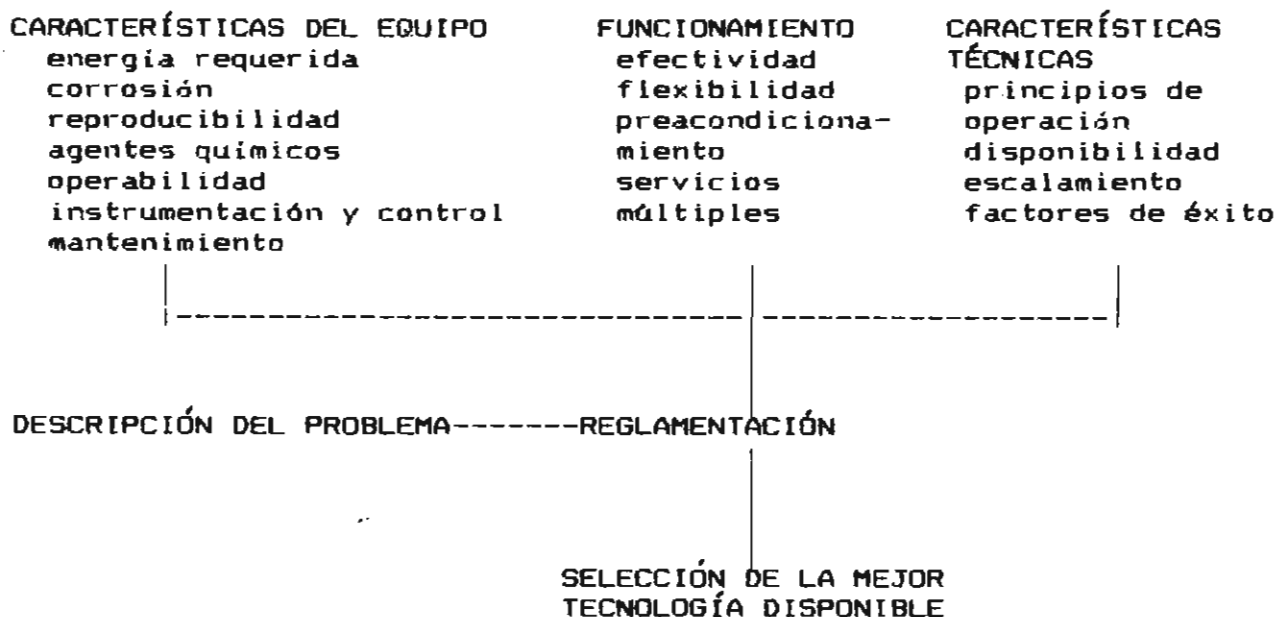
2. MUESTREO Y EVALUACIÓN DEL PROBLEMA



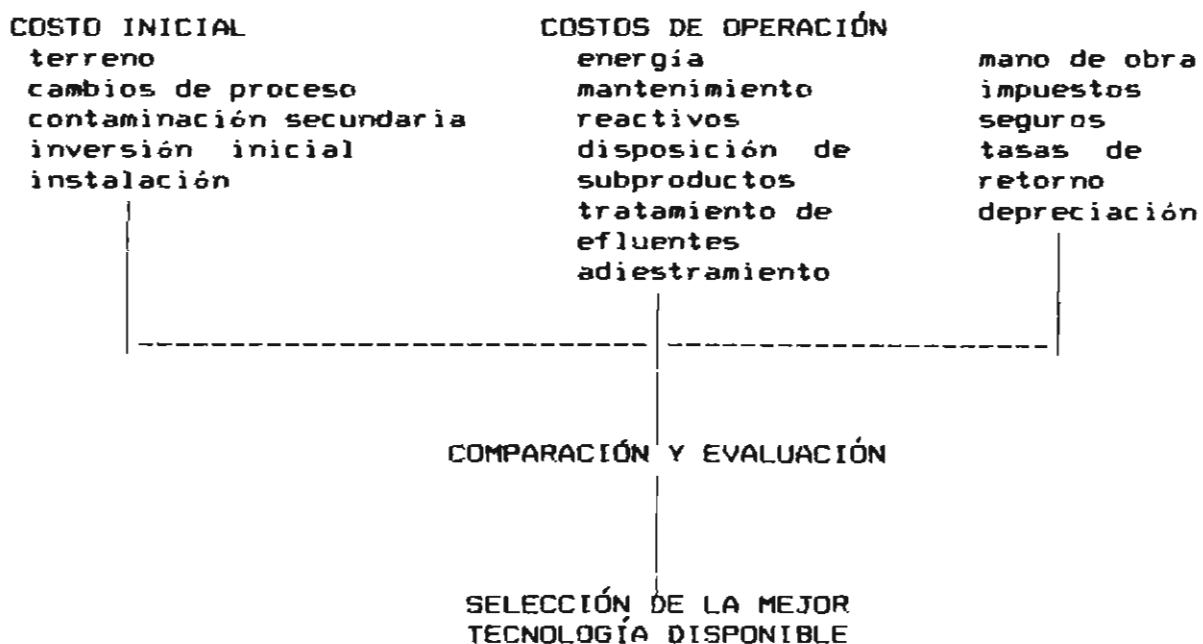
3. ESTUDIOS DE INGENIERÍA



4. EVALUACIÓN DEL EQUIPO DE CONTROL POTENCIAL



5. EVALUACIÓN ECONÓMICA



Si es necesario se realizan estos estudios en paralelo y como un listado útil para tomar decisiones se propone lo siguiente:

- 1) Obtener la información para caracterizar la fuente
- 2) Caracterizar las partículas
- 3) Identificar la tecnología de control disponible
- 4) Establecer los requerimientos de control
- 5) Establecer si existen sistemas de ventilación adecuados para canalizar las emisiones
- 6) Establecer si es recomendable realizar cambios en el proceso
- 7) Establecer las tendencias de control (reglamentación) para el proceso específico
- 8) Establecer las tendencias de la tecnología de control
- 9) Evaluar los costos versus el funcionamiento y eficiencia de los equipos de control aplicables
- 10) Seleccionar la mejor tecnología disponible para los requerimientos de control
- 11) Seleccionar un diseñador/proveedor adecuado
- 12) Construcción e instalación del sistema de control
- 13) Pruebas de arranque y paro del equipo
- 14) Optimización del equipo
- 15) Operación normal del equipo.

Referencias bibliográficas sugeridas

Crawford M. "Air pollution control theory". Mc Graw Hill U.S.A. 1976.

Hinds W. "Aerosol technology" John Wiley & Sons U.S.A. 1982

Licht W. "Air pollution control engineering". Basic calculations for particulate collection. Marcel Dekker, Inc. U.S.A. 1980.

US EPA "Control of particulate emissions". Manual training course 413. Environment Protection Agency U.S.A. 1973.

Wark K. & Warner C. "Air pollution control. Its origin & control". Harper & Row U.S.A 1981.

4. CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS

4.1. Descripción de partículas

En general, las partículas sólidas se presentan en formas muy irregulares, incluidas aquellas que corresponden a estados cristalinos por su parte las partículas líquidas presentes en nieblas y rocíos tienden a ser esféricas.

Las formas irregulares se pueden clasificar como:

1) Isométricas: En las cuales las tres dimensiones tienen aproximadamente la misma magnitud

2) Planas: En las cuales dos dimensiones tienen una longitud mucho mayor que la tercera

y 3) forma de aguja: En las cuales una dimensión es mu o mayor en longitud que las dos restantes.

La forma de las partículas varía de acuerdo con el origen de las mismas y la naturaleza del material, por ejemplo aquellas formadas por condensación son generalmente esféricas.

Es conveniente describir las partículas irregulares en términos de un parámetro de la forma geométrica más parecida, así por ejemplo en el caso de una esfera sería su diámetro "d", en el caso de un cubo su lado "d", para un cilindro la longitud "l" ó el diámetro "d" y para un elipsoide de evolución su radio polar "p" o ecuatorial "r", o bien utilizando los siguientes diámetros:

Diámetro proyectado: El diámetro de un círculo con la misma área que la imagen de la partícula proyectada paralela al plano de el campo visual del microscopio.

Diámetro equivalente: El diámetro de una esfera con un volumen igual al de la partícula.

Diámetro de sedimentación: El diámetro de una esfera de igual densidad con la misma velocidad de asentamiento que la partícula en un fluido específico.

Diámetro aerodinámico: El diámetro de una esfera de densidad unitaria 1 g/cm^3 con la misma velocidad de asentamiento en el aire que la partícula.
Este diámetro se calcula con la ecuación de velocidad terminal descrita en el capítulo 2.

Existen otros diámetros identificados por el microscopio:

- (1) diámetro de Martín: el cual divide el área proyectada en partes iguales a lo largo de la línea paralela a la base del campo visual
- (2) diámetro de feret: La dimension mayor a lo largo de la línea paralela a la base del campo visual
- (3) diámetro máximo: la dimensión mayor sin importar la dirección y:
- (4) diámetro mínimo: La dimensión menor sin importar la dirección

Finalmente, se define la esfericidad de una partícula ϕ como:

$$\phi = \frac{\text{área superficial de una esfera de igual volumen que la partícula}}{\text{área superficial de la partícula}}$$

el valor de ϕ siempre es menor de 1 con los siguientes valores:

figura/ material	ϕ
cubo	0.806
cilindro	$2.62 (1/d)^{2/3} / (1+21/d)$
(para $1/d=10$)	0.579
arena	0.600-0.681
hierro catalítico	0.578
carbón bituminoso	0.625
sílica	0.554-0.628
carbón pulverizado	0.696

El diámetro es un parámetro muy importante dado que las siguientes propiedades están relacionadas con el:

Superficie	\propto	d^2
Volumen	\propto	d^3
Masa	\propto	$d^3 \times \text{densidad}$

La superficie específica Ω se define como:

$$\Omega = \frac{\text{la superficie}}{\text{unidad de volumen}}$$

$$\Omega = 6/d^3 \text{ para una esfera ó cubo}$$

$$\Omega = 2/1 (1+ 2/1 /d) \text{ para un cilindro}$$

4.2.1 Estadística de partículas

En general, las partículas provenientes de diversos procesos tanto de origen industrial como natural, presentan como una de las características más importantes el poseer diferentes tamaños los cuales pueden ser descritos a través del diámetro.

Muy rara vez se obtienen colecciones de partículas en donde todas tengan el mismo diámetro (monodispersas) y dado que la mayoría de las propiedades de los aerosoles dependen del diámetro es necesario caracterizar a estos.

Así, en cuanto al diámetro las partículas pueden ser:

Monodispersas (mismo diámetro)

Polidispersas (diferentes diámetros)

Dado que en la mayoría de los casos serán polidispersas, es necesario representarlos como distribuciones de tamaños, lo cual se realiza generalmente a través de:

- 1) Gráfica de barras
- 2) Histogramas
- 3) Curvas
- 4) Ojivas

Debido a que es frecuente encontrar cerca de 1000 valores de diámetro diferentes, se considera que las distribuciones son continuas y por lo tanto es posible interpretarlas fácilmente de una manera matemática.

Las fracciones de partículas discretas se pueden definir como:

$$f_i = n_i/N = h_i \delta d_i \quad \begin{array}{l} n_i = \text{número de partículas en el rango } i \\ N = \text{número de partículas totales} \end{array}$$

y $\sum f_i = \sum (h_i \delta d_i) = 1.0$ $\begin{array}{l} h_i = \text{altura de un histograma} \\ \delta d_i = \text{base del histograma} \end{array}$

y si se considerarán continuas:

$$df = f(dp)ddp \quad dp = \text{diámetro de la partícula}$$

y

$$\int f(dp)ddp = 1.0 \quad \begin{array}{l} d = \text{diferencial} \\ \int = \text{integral} \end{array}$$

$$dp \text{ prom} = \Sigma d/N = \Sigma n_i d_i / \Sigma n_i = \int dp f(dp) ddp$$

n_i = número de partículas en el grupo i
con diámetro de clase d_i

$N = \Sigma n_i$ = partículas totales

4) media geométrica (el producto de todos los valores elevado a la i/n potencia)

$$dg = (d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot \dots \cdot d_n)^{1/n} = \pi(d_i^{i/n_i})^{1/N}$$

π = producto

i = fracción i ésima

N = partículas totales

o expresada en forma logarítmica:

$$\ln dg = \Sigma n_i \ln d_i / N$$

$$\text{ó } dg = \exp [\Sigma n_i \ln d_i / N]$$

con respecto a los valores de tendencia central las siguientes propiedades son muy importantes:

$$\text{MODA} < \text{MEDIANA} < \text{MEDIA GEOMÉTRICA} < \text{MEDIA ARITMÉTICA}$$

y sólo si la distribución es monodispersa se tendría:

$$dg = dp \text{ prom} = \text{moda} = \text{mediana}$$

Finalmente, la media geométrica tiene un gran uso en la caracterización de la distribución de aerosoles, dado que estos generalmente tienen distribuciones log-normal, por otra parte la media geométrica no se ve afectada por la existencia de valores extremos como puede ocurrir con la media aritmética.

Físicamente en el caso de los aerosoles es posible medir el diámetro de las partículas para caracterizarlas, utilizando las siguientes relaciones:

$$\text{área superficial} \propto d^2 = \pi/4 d^2 \text{ y:}$$

$$\text{masa} \propto d^3 = \pi/6 \times \text{densidad} \times d^3$$

$$\text{ó bien el diámetro másico } dm = (m / \pi \times \text{densidad})^{1/3}$$

o bien utilizando el concepto de momentos, definidos como el equivalente a elevar a una potencia a un estadístico, obteniendo:

En el caso de un rango continuo, se obtienen las siguientes fracciones:

$$fab = \int f(dp) ddp = fi = ni/N = (hi \delta di)$$

y la frecuencia acumulada $F(a)$ desde cero hasta a

$$F(a) = \int f(dp) ddp$$

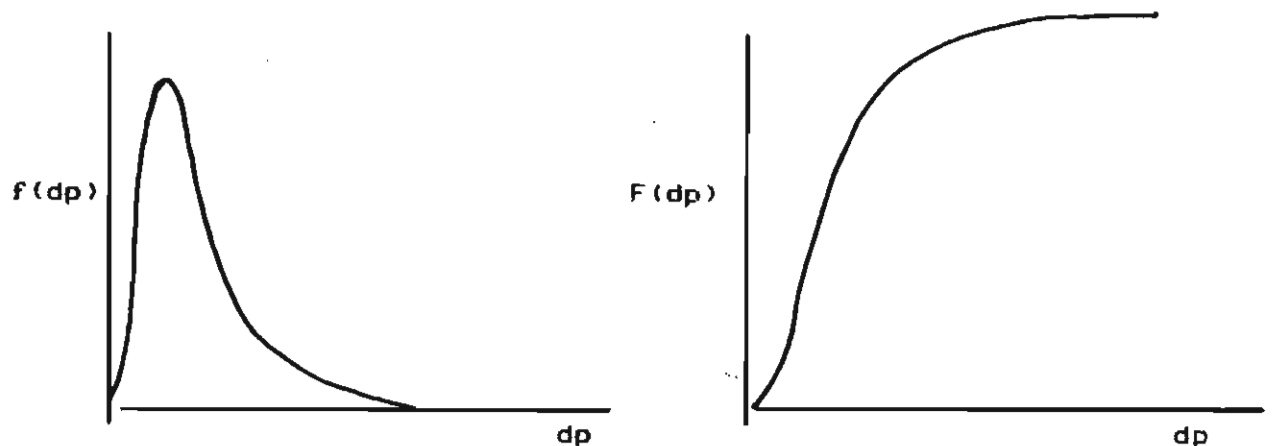
así:

$$fab = F(b) - F(a)$$

o bien

$$f(dp) = dF(dp)/ddp \quad \text{igual a la pendiente de la función de la distribución acumulada}$$

con lo cual se representa la función matemáticamente



CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS

CURVA DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA

La mayoría de las distribuciones se pueden caracterizar con 2 parámetros:

- 1) La medida de tendencia central y:
- 2) la dispersión

Para la primera se utilizan :

- 1) moda (el valor del diámetro que se repite más veces)
- 2) mediana (el valor del diámetro que divide en dos partes iguales a la distribución)
- 3) media aritmética (la suma de todos los valores del diámetro dividida entre el total)

1er momento = d_i = diámetro

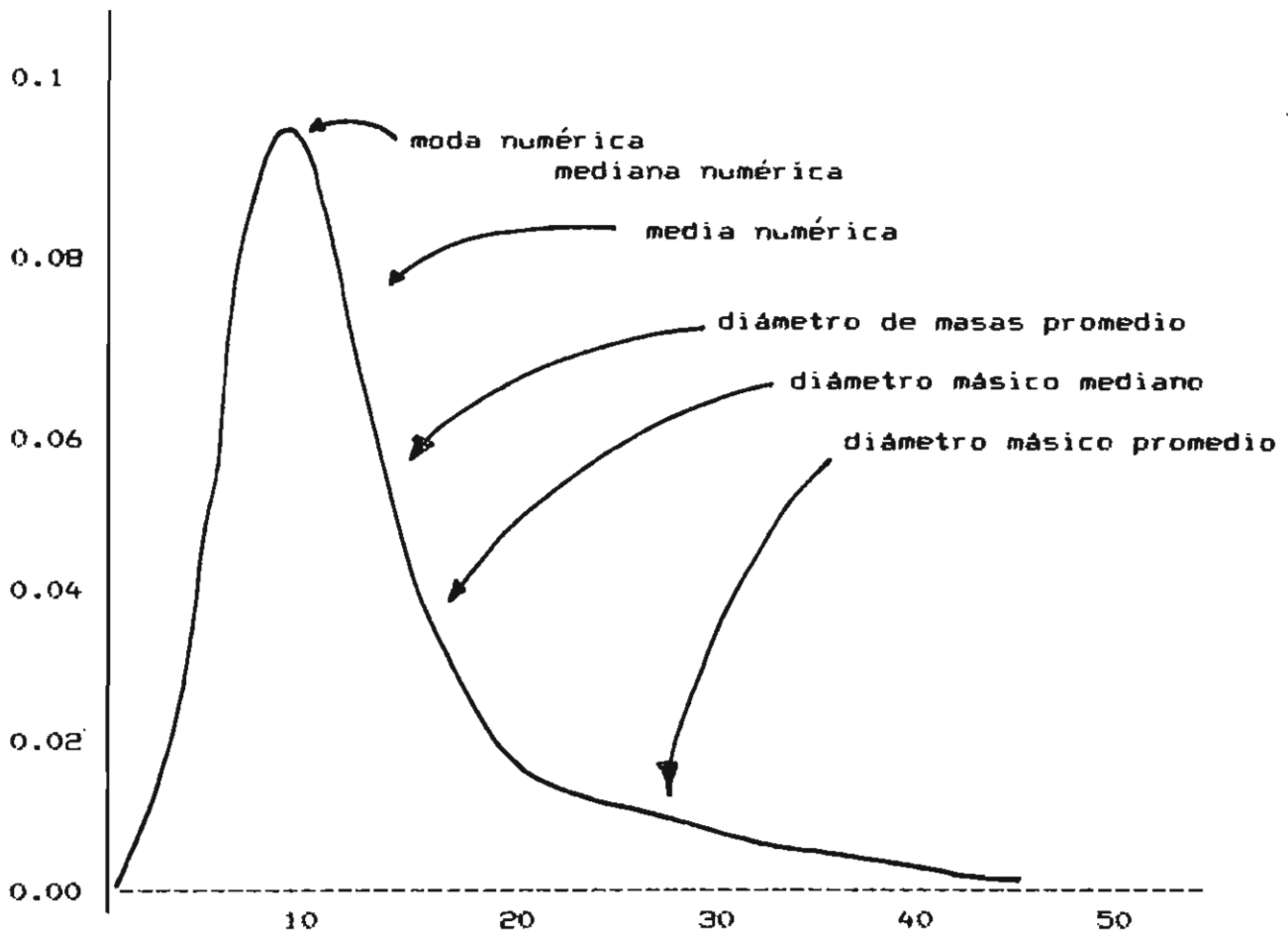
2o. momento = d_i^2 = diámetro al cuadrado \propto área superficial

3o. momento = d_i^3 = diámetro al cubo \propto masa de la partícula

4.2.2 Distribuciones de partículas

De acuerdo con las gráficas que se obtienen empíricamente al graficar la frecuencia relativa o acumulada contra el diámetro de la partícula, se elige el modelo de distribución mas adecuado para el análisis estadístico de la distribución problema.

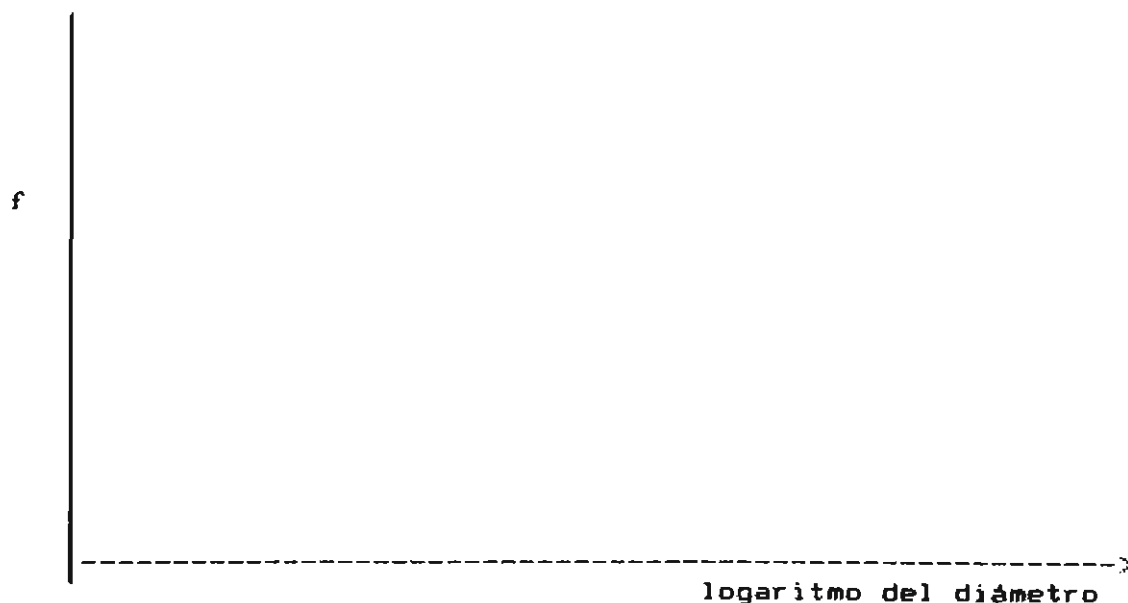
Generalmente las distribuciones de aerosoles presentan curtosis hacia los diámetros menores en donde tienden a concentrarse los valores de las partículas, una gráfica típica que se obtiene es la siguiente:



Estos tipos de distribuciones de aerosoles polidispersos se obtienen en la mayoría de las emisiones provenientes de fuentes fijas y también en los muestreos en los centros urbanos, y para su análisis basado fundamentalmente en utilizar alguna función para normalizar la función, se usa la distribución LOG-NORMAL, y en casos especiales algunas otras tales como las distribuciones ROSIN-RAMMLER, cuando los diámetros de corte para la partícula mayor y menor están bien definidos, la distribución NUKIYAMA-TANASAWA para líquidos atomizados, la distribución de WEIBULL cuando se conoce el diámetro menor, la distribución de ROLLER para material pulverizado, la distribución de WYNN-DAWES para polvos de minas y la distribución multimodal cuando existen varias modas en la distribución. siendo el criterio de selección la bondad del ajuste de la función a los datos experimentales.

La distribución normal se aplica en algunos casos, fundamentalmente cuando tienden a ser distribuciones monodispersas, sin embargo dado que esta distribución requiere que una fracción de partículas tenga un tamaño negativo, y esto no es posible físicamente en aerosoles, su uso es muy limitado.

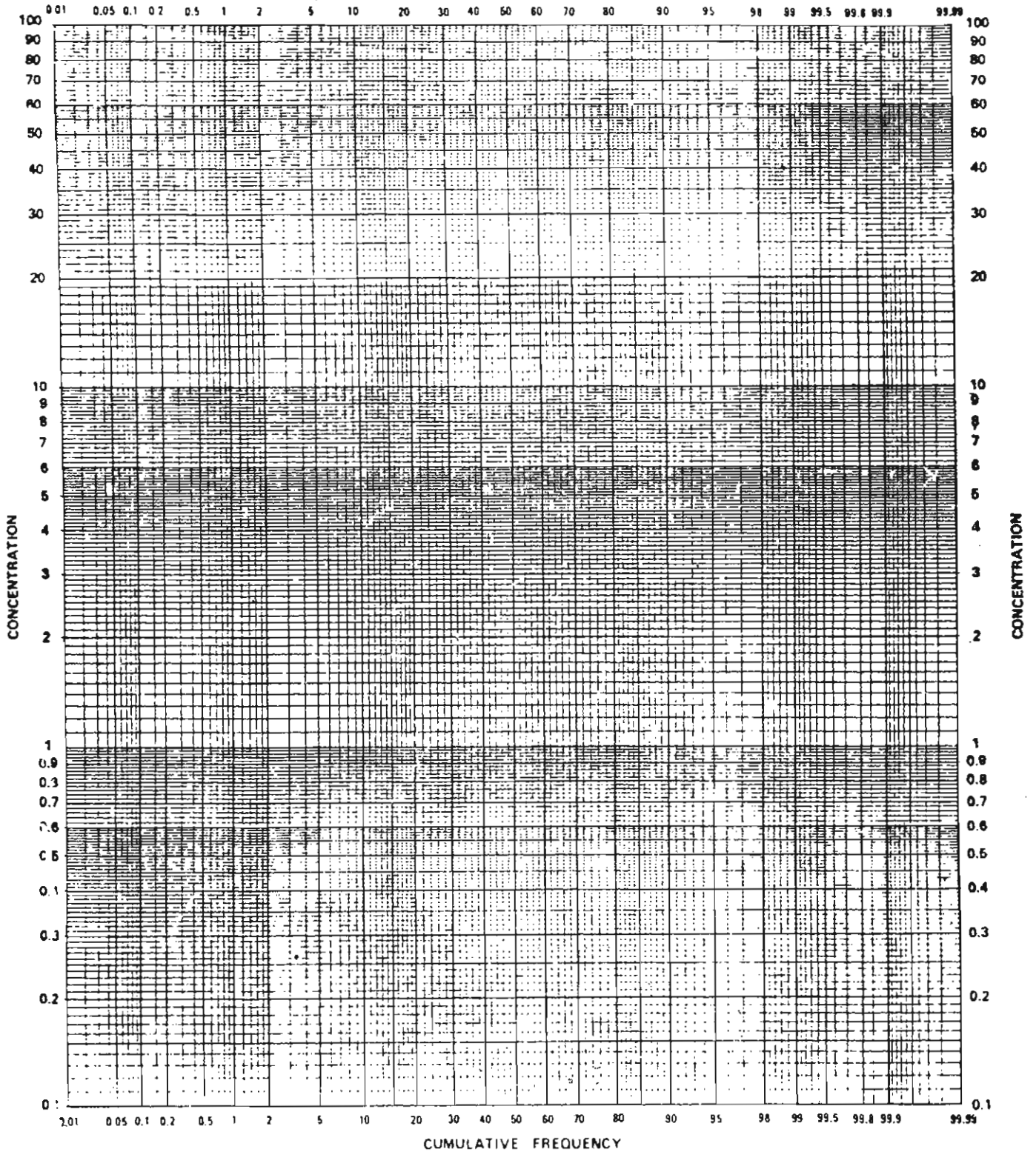
Con respecto a la distribución LOG-NORMAL, cuando se gráfica el logaritmo de la partícula versus la frecuencia se obtiene una curva del tipo normal.



CONSTRUCTED BY THE AUTHORS FROM PAPERS OF

H. E. PROBABILITY & LOG CYCLES
PULFORD & BAKER CO. NEW YORK, N. Y.

CUMULATIVE FREQUENCY



La distribución LOG-NORMAL tiene la siguiente fórmula para su función de frecuencias:

$$df = (1/\sqrt{2\pi}\ln\sigma_g) \exp[-(\ln d_p - \ln CMD)^2/2(\ln\sigma_g)^2] d\ln d_p \quad (1)$$

en donde: CMD = media geométrica

σ_g = desviación geométrica

y $\ln d_g = \sum \ln d_i / N$

$$y \quad \ln \sigma_g = [\sum (\ln d_i - \ln d_g)^2 / (N-1)]^{1/2}$$

dado que $d\ln d_p = dd_p/dp$, la ecuación (1), también se expresa como:

$$df = (1/\sqrt{2\pi}dp\ln\sigma_g) \exp[-(\ln d_p - \ln CMD)^2/2(\ln\sigma_g)^2] dd_p$$

La distribución LOG-NORMAL es particularmente útil cuando la relación entre el diámetro mayor a menor es mayor o igual a 10

$$\text{diámetro mayor} / \text{diámetro menor} \geq 10$$

La distribución LOG-NORMAL se abaliza fácilmente con el uso de gráficas LOG-PROBABILITY, usando la escala de probabilidad (PROBABILITY) como ordenada para la frecuencia.

La escala probabilidad comprime los valores cercanos a la mediana (50%) y los expande en los valores cercanos a los extremos, de tal manera que las gráficas de valor acumulado presentan rectas.

Las gráficas LOG-PROBABILITY se pueden construir en papel aritmético (cuadrulado), graficando el logaritmo del diámetro, contra la unidad probit del porcentaje acumulado, la unidad probit da un desplazamiento lineal de el punto 50% (mediana) en unidades de desviación estandar +5.

dado que para una distribución normal se tiene la siguiente relación

$$\sigma \quad d_{84} - d_{50} = d_{50} - d_{16}$$

tomando logaritmos:

$$\ln \sigma_g = \ln d_{84} - \ln d_{50} = \ln d_{50} - \ln d_{16}$$

$$\text{o bien} \quad \ln \sigma_g = \ln (d_{84}/d_{50}) = \ln (d_{50}/d_{16})$$

$$\text{o} \quad \sigma_g = GSD = d_{84\%}/d_{50\%} = d_{50\%}/d_{16\%} = [d_{84\%}/d_{16\%}]^{1/2}$$

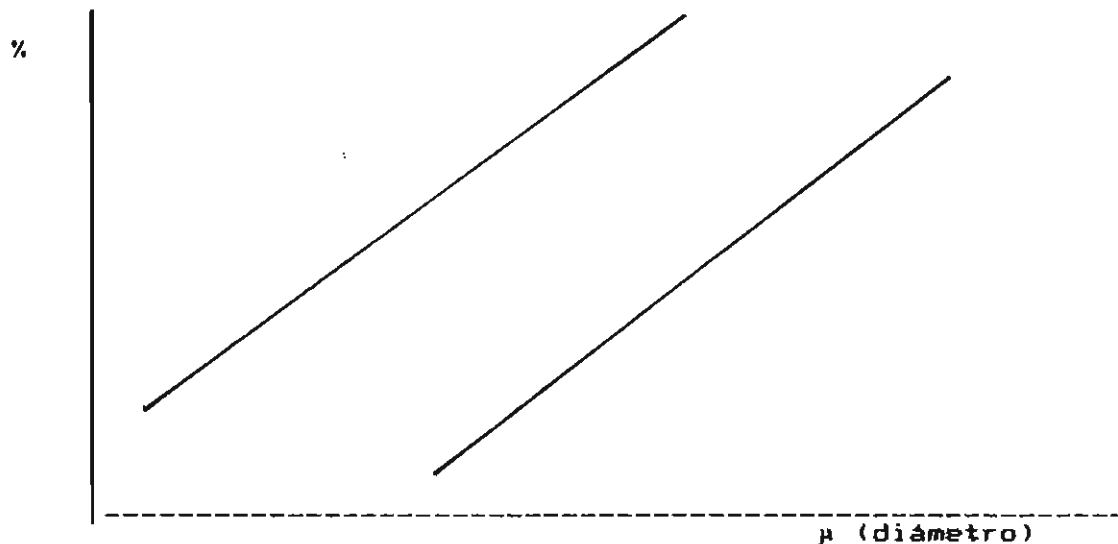
GSD = desviación geométrica estandar

El valor $d_{50\%} = \text{CMD}$, se obtiene de la gráfica, lo mismo que los otros 2 valores: $d_{84\%}$ y $d_{16\%}$, por lo que gráficamente es fácil determinar la desviación geométrica estandard (GSD).

Una de las grandes ventajas de la distribución LOG-NORMAL es que la desviación geométrica estandard permanece constante para todas las distribuciones ponderadas que se generen.

si $\text{GSD} = \text{constante} \implies d_{84\%}/d_{50\%} = \text{constante}$

y todas las líneas son paralelas, con una distancia que las separa función de GSD



Hatch and Choate (1929), derivó unas ecuaciones de conversión de diferentes parámetros estadísticos que se aplican SOLAMENTE a distribuciones que sean LOG-NORMAL lo cual se puede verificar rápidamente al graficar en papel LOG-PROBABILITY, el diámetro versus la frecuencia acumulada, dado que si la distribución es LOG-NORMAL debe de obtenerse una línea recta.

La ecuación tiene la siguiente forma:

$$d_a / \text{CMD} = \exp (b \ln^2 \sigma_g) \quad (2)$$

en donde: $b = \text{constante } f(d_a)$
 $\text{CMD} = \text{diámetro numérico promedio}$

Esta ecuación se aplica de la siguiente manera para obtener el diámetro correspondiente a la mediana obtenido con el momento deseado d_q :

$$q_{\text{MD}} / \text{CMD} = \exp (q \ln^2 \sigma_g)$$

con $b=q=3$ para el diámetro másico

$$mMD/CMD = \exp (3 \ln^2 \sigma g) \quad \text{ó} \quad mMD = CMD \exp (3 \ln^2 \sigma g)$$

o bien para obtener el diámetro promedio de la distribución ponderada d^q en:

$$dqm/CMD = \exp [(q + \frac{1}{2}) \ln^2 \sigma g]$$

así el diámetro promedio másico

$$dmm = CMD \exp (3.5 \ln^2 \sigma g)$$

Otras relaciones útiles son:

$$d^P/CMD = \exp (p/2 \ln^2 \sigma g) \quad \text{con } d^P = \text{diámetro promedio}$$

la moda M , se obtiene con:

$$M = CMD \exp (-1 \ln^2 \sigma g)$$

aplicandose en resumen la siguiente ecuación general:

$$(dqm)_p = CMD \exp [(q + p/2) \ln^2 \sigma g]$$

en donde p = momento

q = distribución ponderada

utilizando los siguientes valores:

convertir CMD a

M
CMD
 d_m
 mMd
 d_mM

b en ecuación (1)

-1 (moda)
0.5 (diámetro promedio numérico)
1.5 (diámetro promedio másico)
3.0 (diámetro mediano másico)
3.5 (diámetro promedio másico)

Referencias bibliograficas sugeridas

- Crawford M. "Air pollution control theory". Mc Graw Hill U.S.A. 1976.
- Hinds W. "Aerosol technology" John Wiley & Sons U.S.A. 1982
- Licht W. "Air pollution control engineering". Basic calculations for particulate collection. Marcel Dekker, Inc. U.S.A. 1980.
- US EPA "Control of particulate emissions". Manual training course 413. Environment Protection Agency U.S.A. 1973.
- Wark K. & Warner C. "Air pollution control. Its origin & control". Harper & Row U.S.A 1981.

5. MUESTREO DE PARTÍCULAS

En la mayoría de los problemas de emisión de contaminantes provenientes de fuentes fijas y que son emitidas a través de ductos o chimeneas, se tienen distribuciones polidispersas, es decir distribuciones de partículas con diferentes diámetros y por consiguiente con diferentes comportamientos tanto en el transporte como en la colección por lo que es necesario caracterizar las emisiones correctamente, para el diseño y/o selección del equipo de control y cumplir con las eficiencias de colección requeridas por la legislación vigente.

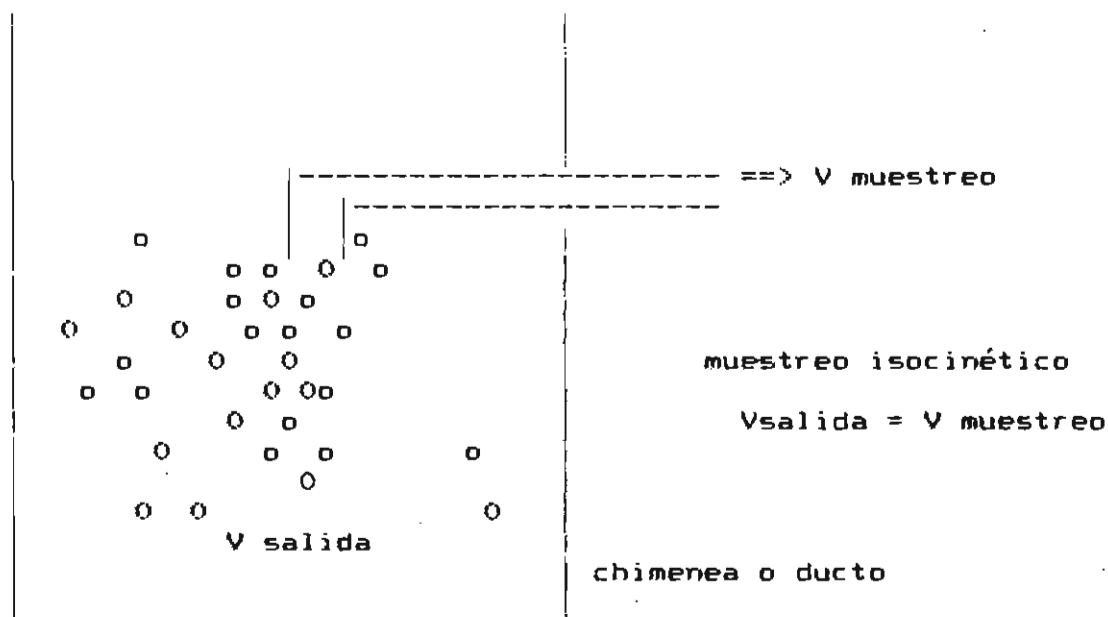
Dado que las partículas tienen diferentes diámetros, viajan a diferentes velocidades, tendiendo las partículas pequeñas a seguir los patrones de flujo del gas de arrastre, el cual al encontrarse con un objeto lo elude sufriendo una deformación en el patrón de flujo, por su parte las partículas grandes, debido a su inercia no pueden seguir las líneas de flujo, impactándose contra el objeto.

Debido a lo anterior, si se introduce una sonda para tomar una muestra de las partículas, se puede obtener una muestra tal que sólo contenga las partículas grandes de la columna de aire que se dirigía a la sonda de muestreo y que para el aerosol será un objeto y como tal tenderá a eludirlo, con el resultado final de que la muestra podría no ser representativa ya que no tendría las partículas pequeñas que si podrían eludir la sonda siguiendo las corrientes de flujo.

Si se muestrea a una velocidad menor que la que viajan las partículas, las pequeñas eludirán la sonda y se tendrá una muestra con menor número de partículas pequeñas que las que realmente viajaban en esa columna de aire, si por el contrario se muestrea a una velocidad mayor, las partículas pequeñas en las columnas de aire cercanas a la sonda se verán succionadas de tal manera que se tendrán finalmente un mayor número de partículas pequeñas que las reales, teniendo en ambos casos el mismo número de partículas grandes dado que por su inercia no pueden eludir la sonda y entraran en ella en el primer caso y seguramente no se verán atraídas a la sonda en el segundo caso a menos que la velocidad de succión sea significativamente grande.

MUESTREO ISOCINÉTICO

El muestreo isocinético es un procedimiento que asegura que se obtenga una muestra representativa de partículas, y como su nombre lo indica significa muestrear a la misma velocidad con la que sale la corriente de aire y partículas, en condiciones isocinéticas el fluido no "siente" la presencia de la sonda y por consiguiente no sufrirá ninguna deformación, sin perder la parte de las partículas pequeñas en esa columna de aire ni atrayendo partículas pequeñas de columnas adyacentes.



El procedimiento de muestreo isocinético ha sido reglamentado y se requiere que se muestree a la misma velocidad con una exactitud de $\pm 10\%$ durante el tiempo de muestreo y se recomienda que para que se cumplan las condiciones anteriores, se lleve a cabo en condiciones de flujo laminar, en flujo uniforme preferentemente. En México la norma oficial que se aplica es la DGN-AA-9-1973.

Para lograr las condiciones descritas, se seleccionan puertos de muestreo, que garanticen estas condiciones con un número mínimo de muestras ó bien se toman números de muestras grandes para tener la confianza de que la muestra es representativa aun, cuando se tenga un flujo con alta turbulencia.

El número mínimo de puntos de muestreo es de 12 para ductos circulares y rectangulares y hasta de 48 en ambos casos, seleccionando 12 cuando el puerto de muestreo se puede instalar a una distancia mínima de 8 veces el diámetro corriente arriba de cualquier perturbación del flujo que pueda crear turbulencia, como sería el caso de un codo, una expansión o contracción, juntas y otros y al menos 2 veces el diámetro corriente abajo de la salida del ducto para evitar turbulencias por efecto de la formación de la vena contracta, en estas condiciones se tiene un patrón de flujo continuo.

Si nos se tienen estas condiciones, es necesario incrementar el número de muestras para tener una representatividad adecuada, llegando un máximo de 48 tomas, en todos los casos se toman puntos colocados en áreas concéntricas o en áreas iguales a través del ducto, y dado que se puede muestrear sobre dos ejes, se divide el número total entre los dos ejes X y Y

El muestreo isocinético implica realizar las siguientes evaluaciones:

1) Medición de la velocidad.

Para lo cual se recomienda la utilización de un tubo pitot tipo "S", el cual mide la presión dinámica de frente y la presión estática corriente abajo y dadas sus dimensiones en la entrada no se obstruye con las partículas.

Para que el muestreo sea representativo se deben de tener condiciones isocinéticas en el 90% de los casos, por lo que la medición de la velocidad debe de llevarse a cabo en forma continua, para realizar los ajustes correspondientes con válvulas de paso (fina y gruesa) en la línea de succión del flujo para mantener las condiciones isocinéticas

El muestreo isocinético involucra una relación matemática directa entre las caídas de presión del tubo pitot en la sonda que indica la velocidad del gas en la chimenea y la velocidad del gas en la boquilla colocada en la sonda con la caída de presión que registra un orificio en el tren de muestreo y que representa el gasto de aire seco a través del tren.

Al cambiar la caída de presión a través del tubo pitot de punto a punto de muestreo se manifiestan los cambios correspondientes en la caída de presión en el orificio, por lo que hay que manipular las válvulas de paso fino y grueso para establecer el gasto que proporcionara la caída de presión a través del orificio requerida para las condiciones isocinéticas.

2) Medición de la composición del gas de arrastre en base seca.

Para la obtención de la velocidad, se requiere conocer el peso molecular del gas de arrastre, por lo que es necesario determinar su composición, lo que se realiza con el analizador de gases ORSAT, el cual determina el porcentaje de oxígeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono en forma directa y de hidrocarburos si esta equipado con un horno eléctrico y de nitrógeno en forma indirecta. Lo que es muy útil dado que en muchos casos el gas de arrastre proviene de procesos de combustión.

3) Medición de la humedad del gas de arrastre.

Se requiere añadir la humedad a la composición de la fracción de gas seco para determinar el peso del gas, realizando lo anterior con un tren de 4 impactores en serie colocados en una caja fría (en baño de hielo), conteniendo los dos primeros 100 ml. de agua, el tercero vacío y el cuarto 200 a 300 g. de un material adsorbente (generalmente sílica gel), para capturar toda la humedad del gas.

4) Determinación de la concentración de partículas en el gas.

Esta determinación se lleva a cabo con un muestreo proporcional el cual determina la cantidad de partículas en un volumen de muestra conocido en condiciones estandar, que ha sido extraída por una sonda equipada con boquillas diseñadas para alcanzar la velocidad requerida, capturando posteriormente la fracción de partículas finas en un filtro que tenga las especificaciones requeridas (diámetro de poro, velocidad de filtración, Etc.) una vez que ha pasado el gas por un ciclón, en donde se remueven la fracción de partículas pesadas y que posteriormente se suman a las del filtro con aquellas que se hayan depositado en la sonda y la cristalería.

El volumen del gas se determina con un gasometro seco, equipado con un orificio con manómetro y válvulas de control grueso y fino del gasto, para variarlo de acuerdo con las características del orificio si es necesario para establecer o mantener la isovelocidad, estando equipado además con medidores de temperatura en lugares claves para verificar el flujo y corregir a condiciones estandar.

La concentración final se reporta en unidades de mg/m^3 ó como establece el reglamento en México, en kilogramo/tonelada ó kilogramo/metro cúbico.

Referencias bibliograficas sugeridas

Crawford M. "Air pollution control theory". Mc Graw Hill U.S.A. 1976.

Hinds W. "Aerosol technology" John Wiley & Sons U.S.A. 1982

Licht W. "Air pollution control engineering". Basic calculations for particulate collection. Marcel Dekker, Inc. U.S.A. 1980.

US EPA "Control of particulate emissions". Manual training course 413. Environment Protection Agency U.S.A. 1973.

Wark K. & Warner C. "Air pollution control. Its origin & control". Harper & Row U.S.A 1981.

Norma oficial mexicana NOM-AA-10-1980

6. PRINCIPIOS DE CONTROL

6.1 CONCEPTOS GENERALES DE COLECCIÓN DE PARTÍCULAS

Para que una partícula sea removida de una corriente gaseosa, debe pasar a través de una zona en la cual este sujeta a la influencia de alguna fuerza (ó fuerzas) que cause que se separe de la corriente del gas y permanezca una cantidad de tiempo suficiente para estar en contacto con alguna superficie de colección.

La colección involucra tres fases:

- 1) Deposición sobre una superficie colectora
- 2) Retención sobre la superficie colectora y:
- 3) Remoción de la superficie colectora.

1) Deposición

Para que ocurra la deposición se requiere:

- a) Una fuerza colectora sobre la partícula en dirección de una superficie.
- b) Una superficie colectora sobre la cual la partícula se depositara
- c) Tiempo suficiente para que la partícula alcance la superficie colectora antes de que salga del equipo de control.

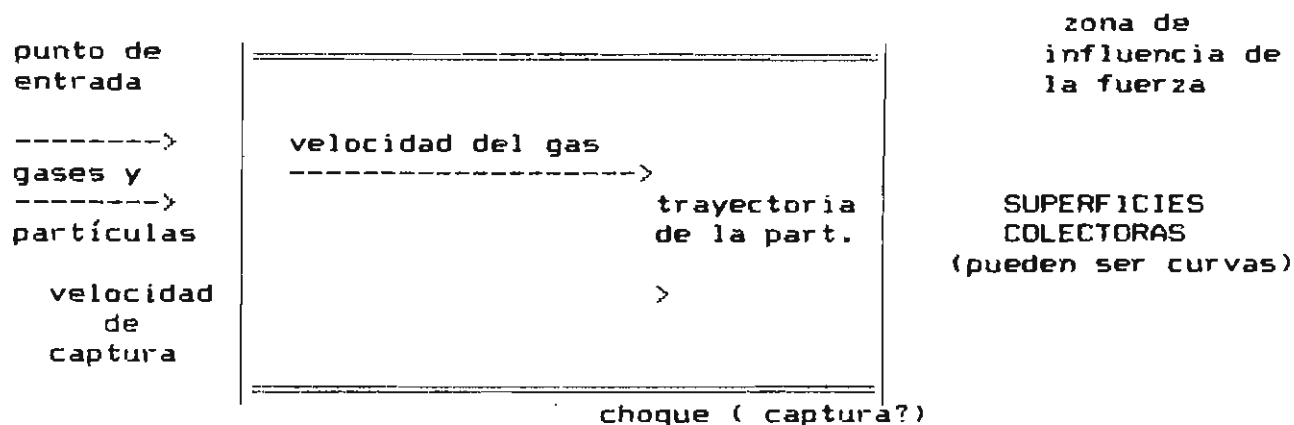
2. Retención

Para que la partícula se retenga en la superficie de colección, es necesario que esta superficie choque con la partícula y tenga fuerzas presentes en la superficie capaces de hacer que permanezca sobre ella misma y superen las tendencias del fluido a reingresar la partícula en el, lo anterior se puede lograr utilizando la fuerza conductora misma o bien acondicionando la superficie para tal efecto, ejemplo de lo anterior podría ser una fuerza residual en un filtro de tela, sustancias adhesivas sobre una placa en una cámara de asentamiento, o una fuerza electrostática sobre un electrodo de captura en un precipitador electrostático.

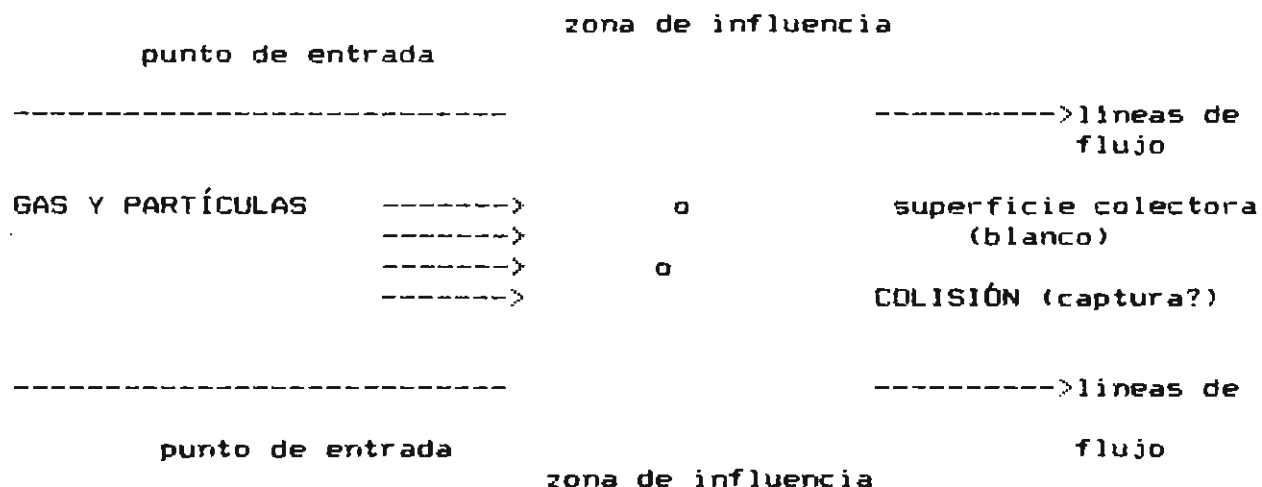
3. Remoción

No es suficiente que la partícula se deposite sobre una superficie para ser capturada, sino que debe de permanecer en la superficie hasta que sea removida intencionalmente y sea conducida hacia un contenedor o tolva con la cual se puede disponer fácilmente como residuo.

En la siguiente figura se observa un diagrama representativo



ó bien:



3. Remoción de la partícula

a) todos los equipos de colección deben tener medios para remover los depósitos acumulados ya sea en forma continua ó intermitente.

b) La remoción es un factor muy importante en el diseño y tiene un gran papel en la eficiencia global.

Los equipos más comunes de control tienen las siguientes características:

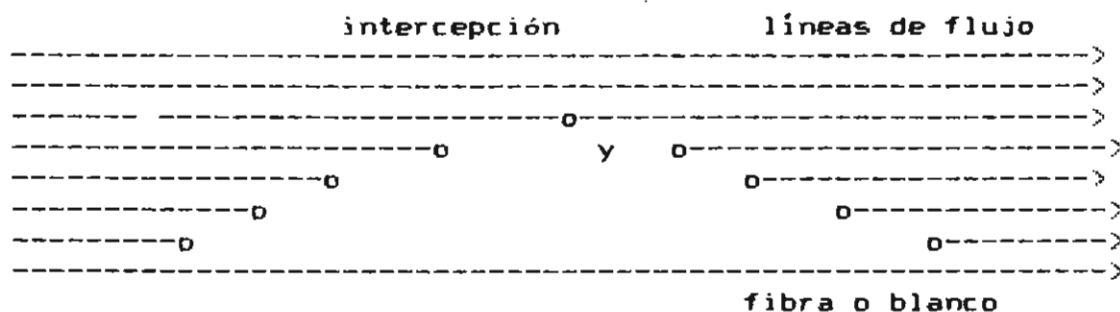
COLECTOR	FUERZA COLECTORA PRIMARIA	SUPERFICIE DE COLECCIÓN
Cámara de asentamiento	gravitacional	plana
ciclón	centrífuga	cilíndrica
precipitador electrostático	electrostática	plano o cilíndrica
colector térmico	termofóresis	plana
impactador	inercial	plana
Filtración (medio)	inercial, difusional intercepción directa electrostática	cilíndrica fibrosa granular
filtración (tela)	inercial, intercepción directa, difusional, electrostática	capas de partículas
Lavadores	inercial, intercepción directa, difusional	blancos esféricos ó irregulares

Para analizar o predecir el funcionamiento de un colector, es necesario conocer:

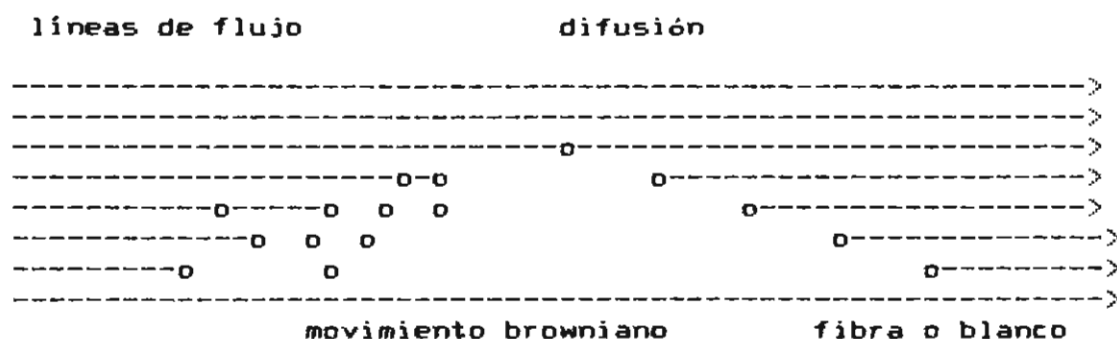
- 1) El tipo de fuerzas actuantes
- 2) La magnitud y dirección de las fuerzas sobre la partícula de densidad conocida y tamaño
- 3) La trayectoria de la partícula calculada a partir de la velocidad de captura, provocada por la fuerza y la corriente gaseosa con la que la partícula entra a la superficie de la zona de influencia.

El movimiento de la partícula en la dirección de la colección siempre estará opuesto por una fuerza de arrastre ejercida por el gas sobre la partícula.

2) intercepción directa:



3) Difusión



En condiciones normales y los siguientes rangos operacionales:

$$0.1 < V_o < 200 \text{ cm/s}$$

$$\text{Ref} < 1$$

$$0.1 < d_f < 50 \mu$$

$$0.005 < \alpha < 0.2$$

en donde:

V_o = velocidad del flujo

Ref = Reynolds de la fibra
o blanco

α = densidad de empaque ó
solidez

d_f = diámetro de la fibra
ó blanco

μ = micras

para:

α = volumen de una fibra o blanco/ volumen total

ó
 $\alpha = 1 - \text{porosidad}$

y: $\text{Ref} = \frac{g d_f V_o}{\mu}$

μ = viscosidad del gas

Se aplican las siguientes ecuaciones:

a) Impactación inercial

Este mecanismo es un caso especial del movimiento curvilíneo de una partícula cuando un obstáculo (fibra, blanco, plato) modifica las líneas de flujo. el cual tiende a evadirlo como se observa en las gráficas.

Las partículas que viajan en el gas tenderan a seguir las líneas de flujo, sin embargo partículas con inercia grande no pueden seguir la línea de flujo y chocan con el blanco, impactandose en el mismo y permaneciendo en la superficie

El parámetro que gobierna la eficiencia de captura es el número de stokes, definido como la relación entre la distancia de paro por la velocidad del flujo entre el diámetro del blanco

$$STK = JV/Dj/2 = \rho dp^2 V Cc / 18 \mu df$$

en donde

STK= Relación de la persistencia de la partícula a el tamaño del blanco.

Ecuaciones utilizadas para la eficiencia son:

$$Ei = J(stk)/2Ku^2 \quad (Yeh \& Liu)$$

en donde: $J = (24.6 - 28 \alpha^{0.62})R^2 - 27.5R^{2.8}$ para $R < 0.4$
 $J = 2.0$ para $R > 0.4$

b) Intercepción directa:

La eficiencia de un solo blanco ó fibra depende del siguiente parametro:

$$r = dp/df$$

y la eficiencia

$$Er = 1/2Ku (2(1+ R \ln (1+R) - (1+R) + (1/1+R))$$

Ku = factor aerodinámico de Kuwawara (adimensional)

$$Ku = -\ln \alpha/2 - 3/4 + \alpha - \alpha^2/4$$

con $Ku = 1.9$ para $\alpha = 0.005$

$Ku = 0.25$ para $\alpha = 0.2$

y se aplica para $df >$ recorrido libre medio y si df es mayor que el recorrido libre medio hay que corregirlo por resblamiento.

para flujos viscosos con bajos números de Reynolds

$$E_R = 1/2(2 - \ln Re) [2(1+R) \ln(1+R) + 1/(1+R) - 1+R]$$

$$\text{con } Ku = 2 - \ln Re$$

para valores de $R \leq 0.1$ la intercepción es despreciable con respecto a la impactación y aumenta su importancia al aumentar R

para valores pequeños de R

$$E_R = 1 - \alpha/Ku \quad R^2/1+R$$

para flujo no viscoso

$$E_R = 1 + R - 1/1+R$$

finalmente de la gráfica 2, la eficiencia dependera de la distancia y de separación entre la línea de flujo y el radio de la fibra o blanco.

$$E = y/rf$$

Para fluido viscoso

La suma de $E_i + E_r \leq 1=R$

y es importante para partículas grandes

c) Difusión

La eficiencia por difusión es función del número adimensional Peclet

$$Pe = df \cdot Vo/D = 3 \pi \mu dp df Vo / KTC$$

D = coeficiente de difusión
 K = constante de Boltzmann
 C = factor de Cunningham
 T = temperatura absoluta

$$E_D = 2 Pe^{-2/3} \quad (\text{Davies})$$

otras expresiones:

$$E_D = K / \sqrt{Pe} \quad \text{con } K = 3 \quad (\text{Loeffler, 1971})$$

para flujo viscoso

$$E_D = [1 / (2 - \ln Re)^{1/3}] 1/Pe^{2/3}$$

Para aerosoles muy finos:

$$E_D = 2.6 (1 - \alpha/Ku)^{1/3} Pe^{1/3} \quad (\text{Lee, Liu, 1982})$$

incrementándose en general E_D cuando el diámetro dp , la velocidad del flujo y el diámetro de la fibra disminuyen.

Existe también interacción entre la intercepción y difusión

$$E_{DR} = 1.24 R^{2/3} / (Ku Pe)^{1/2} \quad \text{para } Pe > 100$$

d) Gravitación:

La captura por gravitación esta controlada por el número adimensional G (asentamiento gravitacional)

$$G = VTS/V_o \quad p \, dp^2 \, Cc \, g / 18 \, \mu \, V_o$$

en donde si V_o y VTS están en la misma dirección verticalmente

$$E_G = G (1+R)$$

si están en dirección opuesta verticalmente

$$E_G = - G (1+R)$$

y si están en dirección horizontal

$$E_G = G^2$$

E_G es importante para velocidades bajas y partículas grandes dado que si

$V_o > 10 \text{ cm/s}$ la impactación es mas importante

e) Deposición electrostática

Este mecanismo es importante cuando se pueden cargar la partícula o el blanco, en estos casos opera la fuerza de Coulomb. si la partícula esta cargada y la fibra no, existe otra fuerza denominada fuerza imagen, la cual se crea por inducción de la partícula a la fibra siendo igual y de signo contrario pero más débil que la de Coulomb.

$$E_q = (\epsilon - 1/\epsilon + 1)^{1/2} [q^2 / 3\pi \, \mu \, dp \, df^2 \, V_o (2 - \ln Re f)]$$

ϵ = constante dieléctrica

q = carga de la partícula

si la fibra esta cargada y la partícula no, el efecto se conoce como fuerza dielectroforética

$$E'Q = [(Kp -1/ Kf +2) (Q^2rp^2/rf \mu Vo)]^{1/3}$$

Q = carga de la fibra
 Kf = constante dieléctrica de la fibra
 Kp = constante dieléctrica de la partícula
 rf = radio de la fibra
 rp = radio de la partícula
 Vo = velocidad del gas
 μ = viscosidad del gas

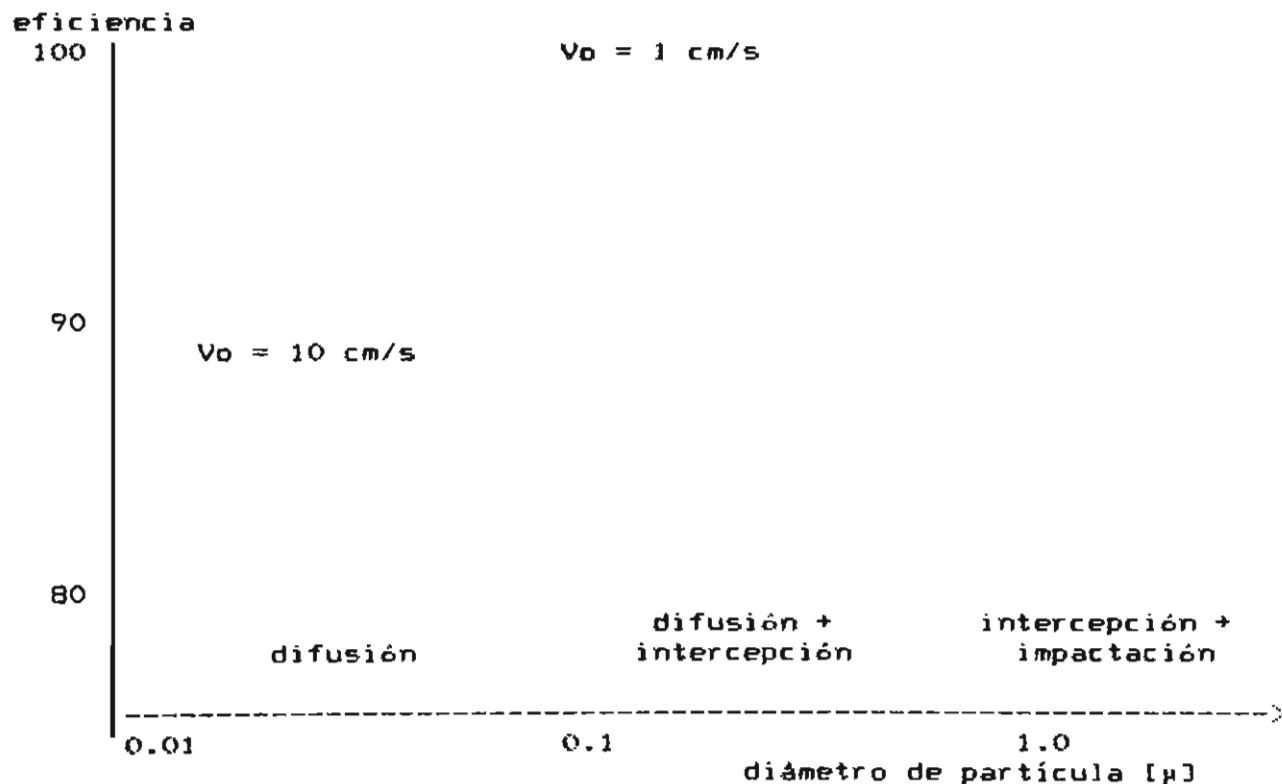
si ambas estan cargadas

$$EQQ = Q qp / 3 Vo rf rp \mu$$

Finalmente, cuando existen varios mecanismos de deposición en un proceso de control como sería el caso de filtración en un colector de tela, la eficiencia global es la suma de las eficiencias:

$$E_T = E_R + E_I + E_D + E_{DR} + E_G + E_q$$

La siguiente gráfica muestra variaciones en la eficiencia de colección en funcion del diámetro y la velocidad del gas para los tres mecanismos mas importantes:



la siguiente tabla muestra el comportamiento de la eficiencia de los mecanismos más importantes en la mayoría de los equipos de control, particularmente en los de filtración en colectores de bolsas con respecto a la velocidad del gas, el diámetro de la fibra o blanco y el diámetro de la partícula, siendo la primera una variable de operación, la segunda una variable que puede ser seleccionada y la tercera una condición inherente del proceso y por lo tanto difícilmente modificable.

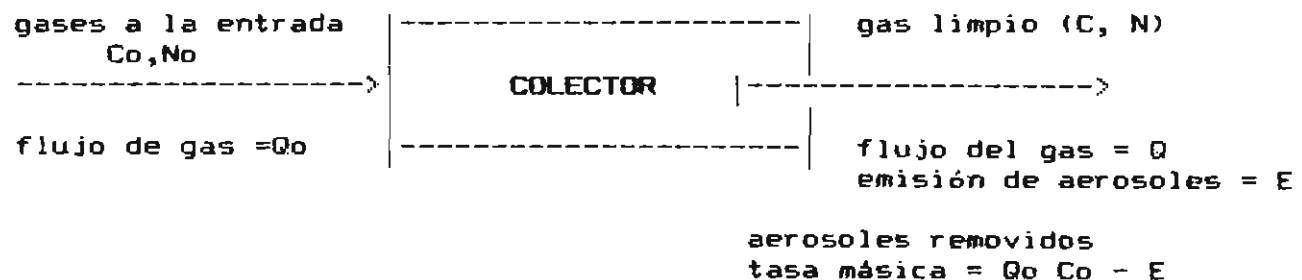
incrementos en	la eficiencia de una sola fibra se modifica por			
	intercepción	impactación	difusión	deposición electrostática
velocidad (V_o)	igual	aumenta	disminuye	disminuye
diámetro de la partícula	aumenta	aumenta	disminuye	disminuye
diámetro de la fibra o blanco	disminuye	disminuye	disminuye	disminuye

6.3 Cálculos de eficiencia

La eficiencia de un equipo de control se puede expresar en términos de:

- a) cantidad de aerosoles removidos
- b) cantidad de aerosoles emitidos

De acuerdo con el diagrama, se pueden definir varias medidas de eficiencia



en donde:

- Q = volumen del flujo del gas
- C = masa de aerosoles por unidad de volumen de gas
- N = número de aerosoles por unidad de volumen
- E = emisión másica de aerosoles no capturados = Q_c

y se tiene:

Eficiencia de colección másica

$$\mu_m = C_o - C / C_o = Q_o C_o - E / Q_o C_o = 1 - E / Q_o C_o = C / Q_o C_o$$

$$\text{ó bien Eficiencia} = \frac{\text{masa a la entrada} - \text{masa a la salida}}{\text{masa a la entrada}}$$

Eficiencia de colección superficial

$$\mu_a = \frac{\text{área superficial de las partículas colectadas}}{\text{área total de las partículas a la entrada}}$$

Eficiencia de colección numérica

$$\mu_N = N_o - N / N_o = Q_o N_o - Q_n / Q_o N_o$$

Penetración basada en la emisión másica

$$P = E / Q_o C_o = C / C_o = 1 - \mu_m$$

$$\text{ó Penetración} = \frac{\text{masa a la salida}}{\text{masa a la entrada}}$$

Factor de descontaminación

$$F.D. = C_o / C = 1 / P$$

Índice de descontaminación

$$I.D. = \text{Log } F.D. = \text{Log } 1/P$$

Número de unidades de transferencia

Concepto similar al que se utiliza en torres de absorción y que significa la dificultad de remoción de un soluto o contaminante.

$$NUT = \text{Ln } 1/P = 2.30 \text{ D.I.}$$

La penetración, el factor de descontaminación y el índice de descontaminación son muy útiles para expresar el funcionamiento de un colector cuando existe una cantidad muy pequeña de material NO colectado, la penetración refleja en múltiplos de 10 cambios de un décimo en la eficiencia siendo más fácil de interpretar cuando se utiliza en equipos de alta eficiencia o en equipos en serie y el término aparece en diversos modelos utilizados en diseño de equipo, un conjunto de diversos valores de diámetro es una curva de penetración.

La siguiente tabla compara eficiencias de 100 %, 99.99 %, 99.90 % y 99.00% con los otros indicadores.

Eficiencia másica global	(100)	99.99	99.90	99.00
Penetración	(100 P)	0.01	0.10	1.00
Factor de descontaminación	D.F.	100000	1000	100
Índice de descontaminación	I.D.	4	3	2
Número de unidades de transferencia NTU		9.210	6.908	4.605

Referencias bibliográficas

Donovan R.P. "Fabric filtration for combustion sources". Fundamentals and basic technology. Marcel Dekker U.S.A. 1985.

Hinds W. " Aerosol technology" John Wiley & Sons U.S.A. 1982.

Licht W "Air pollution control engineering". basic calculations for particulate collection. Marcel Dekker U.S.A. 1980.

US EPA "control of particulate emissions" manual training course 413 Environmental Protection Agency U.S.A. 1973.

US EPA "Control techniques for particulate emissions from stationary sources. EPA-450/3.81 U.S.A 1982.

7. EQUIPO DE CONTROL

7.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Los equipos de control de partículas se diseñan en función de las propiedades aerodinámicas de las partículas, su comportamiento y sus características principales, de las cuales el diámetro es determinante dado que la eficiencia del mismo se expresa en función de eficiencias fraccionales para un diámetro específico.

De acuerdo con los temas tratados en los capítulos 2 y 6, el tamaño y la forma serán determinantes en el comportamiento aerodinámico de la partícula y por otra parte, propiedades eléctricas, tendencia a flocular, crecimiento por condensación, aglomeración, así como las características del gas de arrastre, la reglamentación aplicable y el costo del equipo, serán los factores determinantes para la selección final del equipo de control.

La siguiente tabla muestra la dependencia de la eficiencia de los diferentes equipos de control del diámetro de partícula:

EQUIPO DE CONTROL	MECANISMO DE CAPTURA	FUNCIÓN DEL DIÁMETRO
CÁMARA DE ASENTAMIENTO	ASENTAMIENTO GRAVITACIONAL	D_p^2
CICLÓN	SEPARACIÓN INERCIAL	D_p^2
FILTROS DE TELA	IMPACTACIÓN SOBRE SUPERFICIE SECA	D_p^2
	INTERCEPCIÓN	D_p
	DIFUSIÓN A SUPERFICIE SECA	$1/D_p$
PRECIPITACIÓN ELECTROSTÁTICA	ATRACCION ELECTROSTÁTICA	D_p^2 Y D_p
LAVADORES HÚMEDOS	IMPACTACIÓN SOBRE SUPERFICIES	D_p^2
	IMPACTACIÓN SOBRE GOTA	D_p^2
	DIFUSIÓN A SUPERFICIES HUMEDAS	$1/D_p$
	DIFUSIÓN SOBRE GOTA	$1/D_p$
INCINERACIÓN	OXIDACIÓN DE LA PARTÍCULA	$1/D_p$

7.2. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS DE CONTROL

La selección y/o diseño de un equipo de control adecuado requiere de tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Reglamentos de control
- b) Características de operación

- c) Características de las emisiones: concentración, distribución de diámetro de partículas
- d) Consideraciones económicas: costo, energía, mantenimiento etc.

Los equipos se clasifican como:

- 1) Colectores mecánicos
- 2) Colectores electrostáticos
- 3) Lavadores húmedos
- 4) Sistemas de filtración

Finalmente, el diseño básico de los equipos de control requiere que se tomen en cuenta además lo siguiente:

- tamaño del equipo y disponibilidad de espacio
- instrumentación
- disponibilidad comercial y de refacciones y consumibles
- consumo de potencia
- protección contra la corrosión y abrasión.
- susceptibilidad a la humedad y congelación.
- requerimientos de ventilación
- requerimientos de manejo de partículas removidas
- necesidades de mantenimiento
- requerimientos de adiestramiento de personal.

7.3 DISEÑO BÁSICO DE EQUIPOS DE CONTROL

1 COLECTORES MECÁNICOS

Los colectores mecánicos son equipos que utilizan como mecanismos de deposición de partículas: asentamiento gravitacional, e impactación inercial en seco, estos equipos tienen una eficiencia significativa sólo en los casos de partículas grandes, y son capaces de manejar grandes concentraciones operando en forma continua sin problemas cuando están bien diseñados y tienen adecuado mantenimiento, son además los equipos de menor costo, sin embargo en la actualidad debido a los requerimientos de control, generalmente se usan como prelimpiadores, removiendo las partículas grandes, eliminando cargas en los equipos de alta eficiencia y reduciendo los costos de estos últimos.

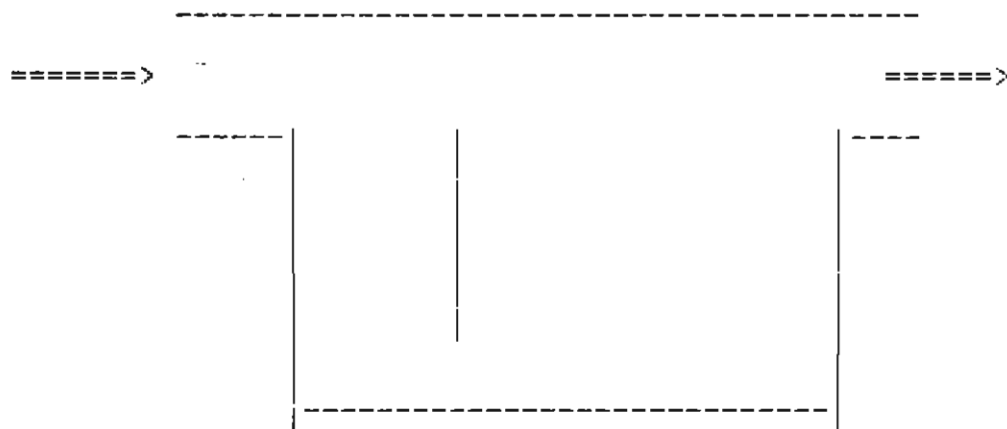
Los colectores mecánicos más utilizados son:

tipo	mecanismo de captura
cámaras de asentamiento	asentamiento gravitacional
colectores centrífugos	colección inercial

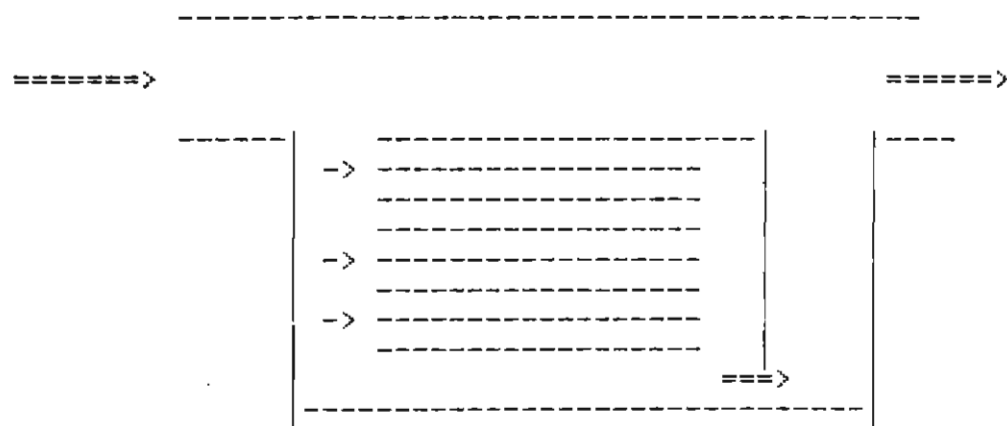
Cámaras de asentamiento:

Las cámaras de asentamiento consisten en dos tipos básicos: la cámara de expansión simple y la cámara de charolas múltiples (tipo Howard)

a) cámara simple:



a) cámara de charolas múltiples:



las partículas grandes son removidas en las cámaras de asentamiento, depositándose en las superficies de colección, ya sea las charolas ó bien el fondo, las cámaras estan diseñadas para trabajar con bajas velocidades con un mínimo de turbulencia en rangos de 0.3 a 3.0 m/s y generalmente las partículas viajan con velocidades mayores a la salida del proceso, y al reducir la velocidad se asientan por gravedad, reduciendo la velocidad simultáneamente con una expansión del ducto dentro de la cámara, la cual debe tener unas dimensiones tales que permitan la reducción deseada.

Parámetros de diseño

tiempo de residencia

$$t_R = Bc Lc Hc / Q$$

Bc = ancho de la camara m

Lc = longitud de la camara m

Hc = altura de la camara m

Q = gasto del gas m³/s

Si la partícula entra a la cámara con a una distancia Hp arriba del nivel menor de la cámara con una altura H, debe caer esta distancia Hp antes de que viaje la distancia L si la partícula va a ser colectada.

Si se asume que la velocidad de la partícula Vx es la misma que la del gas y que además se tiene un perfil uniforme de la velocidad, el tiempo de residencia es :

$$t_R = Lc/Vx$$

Una partícula de diámetro Dp se asentará una distancia Hr en un tiempo tR y si esta distancia Hr es mayor que Hc, la partícula será capturada con una eficiencia del 100%, por lo que la colección de una partícula dependerá de la posición de entrada Hp, y la eficiencia μ es igual a:

$$\mu_p = H_p / H_c \quad (1)$$

para una partícula de diámetro Dp, es decir una eficiencia fraccional, para ese diámetro.

La distancia Hp que una partícula de un diámetro dado se asentará dependerá además de la velocidad de asentamiento Vy, por lo que:

$$t_R = V_y t_R$$

sustituyendo en (1)

$$\mu p = V_y L_c / V_x H_c$$

dado que V_y es igual a la velocidad terminal de Stokes

$$V_y = g D_p^2 (\rho_p - \rho_g) / 18 \mu$$

se tiene que

$$V_x = Q / H_c B_c$$

y se obtiene la ecuación general

$$\mu p = K g D_p^2 (\rho_p - \rho_g) L_c B_c N_c / 18 \mu Q$$

K = factor de corrección empírico
igual a 0.5 cuando no existe otra
información.

N_c = número de placas paralelas o
charolas 1 para una cámara
simple y $N + 1$ para tipo Howard

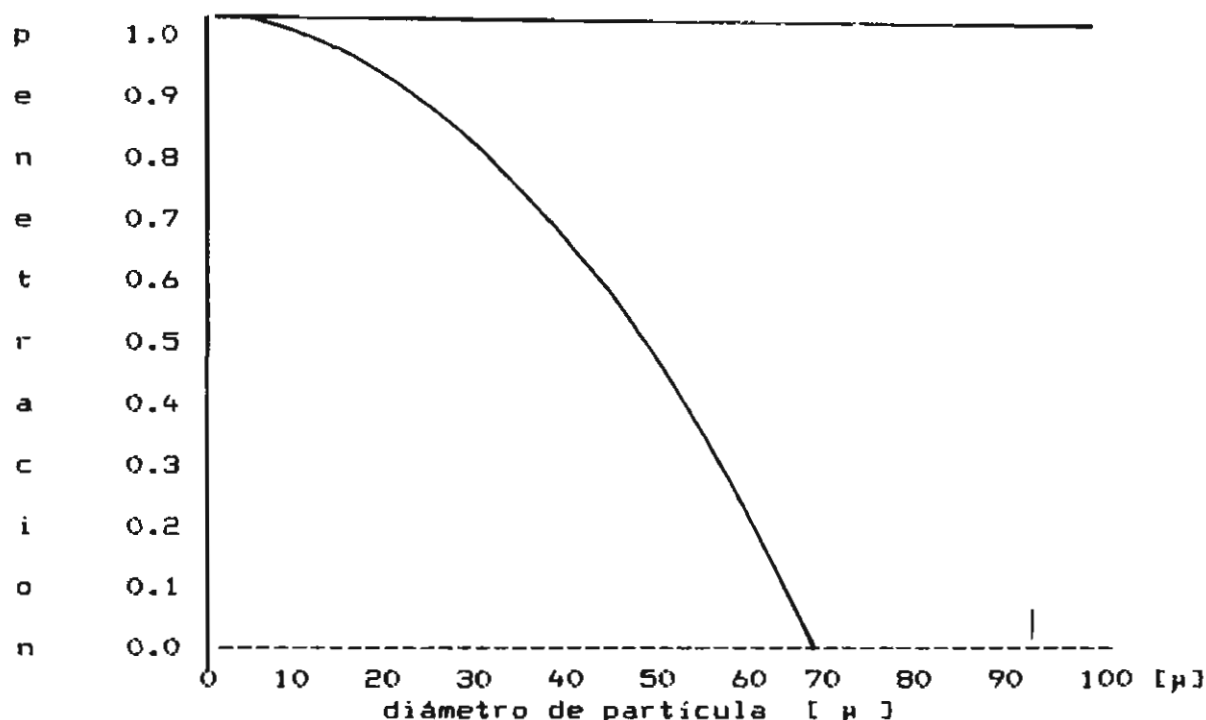
ρ_p = densidad de la partícula

ρ_g = densidad del gas

El factor K contempla desviaciones de la velocidad de Stokes dado que las partículas no necesariamente tendrán una caída libre sin modificaciones en el flujo, aglomeraciones o reingreso a la corriente del aire.

Las cámaras de asentamiento tienen caídas de presión de 0.5 - 1 pulgadas de agua y la eficiencia será casi nula para partículas menores de 2μ de diámetro, de 1 - 2 % para partículas en el rango de 2-5 μ de diámetro y tienen eficiencias significativas (80%) para diámetros mayores de 80 μ de acuerdo con la siguiente gráfica de penetración:

$$P = 1 - H_p / H_c = 1 - V_y B_c L_c / Q$$



Finalmente las características básicas de las camaras de asentamiento son: 1) bajo costo de energía, 2) bajo mantenimiento, 3) bajo costo de instalación, 4) excelente reproducibilidad, 5) gran tamaño físico y 6) baja eficiencia de colección.

Colectores inerciales

El colector inercial más común es el ciclón, el cual consiste en una estructura sin partes móviles que separa partículas de una corriente de aire, transformando la velocidad de entrada en un vórtice confinado el cual produce una fuerza centrífuga que conduce las partículas suspendidas hacia las paredes del colector, en donde al entrar a la capa límite cercana a la pared del ciclón, pierden energía por el esfuerzo cortante viscoso y la fricción mecánica, actuando dos fuerzas: la centrífuga y una fuerza de arrastre que es función de la densidad, el diámetro, la forma, etc. de la partícula, y cualquier partícula para la cual la fuerza centrífuga sea mayor que la de arrastre, alcanzará la pared siendo colectada en otro vortice que se forma en la tolva en el fondo del ciclón.

A pesar de que los ciclones son simples, económicos y pueden ser construidos de diversos materiales para manejar un rango amplio de condiciones físicas y químicas de operación, existen pocas aplicaciones en las cuales se obtengan eficiencias en el rango de 80-90% para partículas menores de 25 μ de diámetro. Aún cuando ciclones con un diámetro menor que nueve pulgadas han sido denominados como de alta eficiencia debido a que crean grandes fuerzas de separación y aumentan la eficiencia.

Los ciclones pueden ser clasificados en cuatro categorías básicas de acuerdo con los métodos usados para remover el material colectado e introducir la corriente gaseosa dentro de la unidad:

- a) Entrada tangencial con salida del polvo axial
- b) Entrada tangencial con salida del polvo periférica
- c) Entrada axial con salida del polvo axial y:
- d) entrada axial con descarga del polvo periférica

a) entrada tangencial con salida de polvo axial

El ciclón más simple y de mayor uso es el primero y consiste de una sección de entrada, una sección cilíndrica, una sección cónica, un tubo de salida del gas y un tubo de salida del polvo. La separación es función del paso del gas a través de la sección cilíndrica y la inercia del gas se incrementa con incrementos en el gasto y disminuye con incrementos en el diámetro de la sección, hasta un límite superior en el cual por incrementos en la turbulencia debido a altas velocidades pueden modificar la concentración.

La fuerza centrífuga aplicada ala partícula varía con el cuadrado de la velocidad de entrada e inversamente con el radio del ciclón, los que al combinarse obtienen el factor adimensional de separación:

$$S = V^2 / rg$$

S = factor de separación
V = velocidad a la entrada
r = radio del ciclón
g = constante gravitacional

Aún cuando no existe una perfecta correlación entre el factor de separación y la eficiencia de colección, este factor es útil dado que para ciclones de diseño y uso similar la eficiencia varía directamente en función del factor de separación.

Para estos ciclones conocidos como ciclones de Laple existen las siguientes dimensiones típicas:

Diámetro del cilindro mayor	Dc
longitud del cilindro mayor	Lc = 2 Dc
longitud del cono	Zc = Dc / 2
diámetro de la salida del gas	De = Dc / 2

longitud de la salida del gas $H_c + S_c = 5/8 D_c$

altura de la entrada del gas $H_c = D_c / 2$

ancho de la entrada del gas $B_c = D_c / 4$

salida del polvo $J_c = D_c / 4$

en donde S_c es la altura del tubo de salida a la base de la sección de entrada

para estos ciclones en general la eficiencia se incrementa con incrementos en

- 1) densidad de la partícula
- 2) velocidad de entrada
- 3) longitud del cuerpo del ciclón
- 4) Número de revoluciones en el vórtice (experimentalmente hay 1.5 en promedio para ciclones de configuración normal)
- 5) relación del diámetro del cuerpo del ciclón a el diámetro de salida
- 6) diámetro de la partícula
- 7) cantidad de polvo en el gas de arrastre y:
- 8) paredes lisas y no rugosas

de igual manera la eficiencia tiende a reducir con incrementos en:

- 1) viscosidad del gas de arrastre
- 2) diámetro del ciclón
- 3) diámetro de la salida del gas
- 4) ancho del ducto de entrada
- 5) área de entrada y:
- 6) densidad del gas

estos ciclones tienen una eficiencia media, con diámetros menores de 4 metros y operando con caídas de presión de 0.5 a 1.5 kPa, siendo su eficiencia global, función de la distribución de las partículas.

b) Entrada tangencial con salida periférica

Los ciclones de entrada tangencial con salida periférica tienen una configuración muy parecida a los de entrada tangencial y salida axial.

c) Entrada axial y descarga axial

Este tipo de ciclón llamado de doble vórtice consiste en una entrada por el fondo de un cilindro largo con aspas móviles, la corriente de gas forma un vórtice primario hacia arriba y además se generan vórtices secundarios por las aspas o por boquillas inyectoras fuera del primer vórtice con un movimiento hacia abajo, las partículas en el vórtice interno primario se mueven a través de las líneas de flujo y dentro del vórtice secundario hacia abajo, separándose en el fondo de la unidad cuando el vórtice secundario cambia de dirección.

La caída de presión de este tipo de colectores varía entre 3 a 6 kPa. y se reportan eficiencias mayores de 99 % para partículas mayores de 6 μ de diámetro y mayores de 95% para partículas mayores de 1 μ de diámetro

Existen también ciclones de entrada axial múltiple , con salida axial y consiste generalmente en numerosos ciclones de diámetro pequeño trabajando en paralelo, alcanzando altas eficiencias por los diámetros pequeños sin sacrificar la capacidad de manejar largos volúmenes.

Los diámetros varían entre 15 a 60 cm operando con caídas de presión de 0.5 a 1.5 kPa. , la entrada es axial con múltiples de entrada y salida conectados a los ciclones paralelos el cual varía en número de 9 a 200 y operando correctamente reportan eficiencias mayores de 90% para partículas entre 5 y 10 μ de diámetro

d) Entrada axial múltiple con descarga periférica

Este tipo de ciclón es una variación del multiciclón en donde el gas esta en un movimiento tipo vortice provocado por una aspa fija y el polvo es colectado en las paredes por fuerzas inerciales, la parte central esta relativamente libre de partículas y sale axialmente.

Parámetros de diseño

Además de la configuración típica existen otras de acuerdo con criterios de diseño establecidos por diversos autores para ciclones con entrada tangencial:

parámetro	alta eficiencia			uso general	
	Stairmand	Swift	Lapple	Swift	Peterson & Whitby
Dc	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Hc	0.5	0.44	0.5	0.5	0.583
Bc	0.2	0.21	0.25	0.25	0.208
Hc +Sc	0.5	0.5	0.625	0.6	0.583
De	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
Zc	1.5	1.4	2.0	1.75	1.333
Zc + Hc	4.0	3.9	4.0	3.75	3.17
Jc	0.375	0.4	0.25	0.4	0.5

en donde los parámetros tienen el mismo significado que para el ciclón típico o de Laple.

El funcionamiento de los separadores ciclónicos depende de la distribución de partículas y se han desarrollado relaciones teóricas basadas en dos diferentes parámetros: el diámetro crítico o sea aquel para el cual existe una eficiencia de colección del 100% y el diámetro de corte 50% para el cual existe una eficiencia de colección del 50%.

Existen diversos modelos para describir la penetración de acuerdo con diferentes enfoques para explicar el comportamiento de las partículas dentro del ciclón, Leith & Licht basan su modelo en el concepto de un mezclado radial dentro del cilindro del ciclón debido a la combinación de mezclado turbulento y choque de partículas con la pared, obteniendo la siguiente ecuación de penetración en función del diámetro de partícula.

$$P_i = e^{-2} [KQ_p (n+1)/d^{18\mu/2N+2}] [d_i^{-1/n+1}]$$

En donde:

$$n = 1 - (T/283)^{0.3} [1 - 0.67 (D)^{0.14}]$$

$$K = 8 [V_s + 0.5 V_{nl})/D^3] / [H/D]^2 [B/D]^2$$

$$V_s = \pi/4 [S - 0.5a] [D^2 - D_a]^2$$

$$V = \pi/4 D^2 (h-S) + \pi/4 [(1+S-h)/3] D^2 [1+d/D + d^2/2] - \pi D e^2 l/4$$

$$d = D - [(D-B) (S+1-h)] / H-h$$

$$l = 2.3 D e (D^2/ab)^{0.33}$$

para:

S = altura de la salida [m]
a = altura del tubo de entrada [m]
De = diámetro de la salida [m]
D = diámetro del ciclindro principal del ciclón [m]
h = altura del cilindro del ciclón [m]
l = longitud natural [m]
H = altura total [m]
B = diámetro de la salida del cono del ciclón [m]
b = ancho de la entrada del ciclón [m]
p = densidad de la partícula kg/m³
Q = gasto del gas m³/s
μ = viscosidad del gas
Pi = penetración de la partícula i (adimensional)

Laple utilizó el diámetro de corte 50%, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$d_{50} = 0.308 [(9\mu g_{sc}) / 2\pi N_t v_i (p - g)]^{0.5}$$

con

$$N_t = (V/Q/\pi D) V$$

en donde:

d_{50} = diámetro colectado con una eficiencia del 50%
 μg = viscosidad del gas kg/m-s
 B_c = ancho de la entrada del gas m
 v_i = velocidad del gas a la entrada m/s
 p = densidad de la partícula
 g = densidad del gas
 N_t = número efectivo de giros adimensional
 V = volumen del ciclón m^3
 Q = gasto del gas m^3/s
 D = diámetro del cilindro del ciclón m

con estas ecuaciones se pueden comparar el funcionamiento de diversos ciclones como se observa en la siguiente tabla:

EFECTOS EN LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	
Variable	relación
tasa de flujo	$P_1/P_2 = (Q_2/Q_1)^{0.5}$
densidad de la partícula	$P_1/P_2 = (p_2 - g_2 / p_1 - g_1)^{0.5}$
viscosidad del gas	$P_1/P_2 = (\mu_1/\mu_2)^{0.5}$
carga de partículas	$P_1/P_2 = (C_2/C_1)^{0.182}$

Caida de presión

Los ciclones tienen una caída de presión en el rango de 0.25 a 1.5 KPa. como consecuencia de pérdidas de energía cinética en los vórtices, paredes, entradas y salidas. la ecuación más utilizada para el cálculo de la caída de presión es la siguiente:

$$PS = 7.6 \cdot 10^{-6} g V_i^2 N_h$$

en donde:

$$N_h = 16 a b / D e^2$$

PS = pérdidas de presión estática m de agua
 g = densidad del gas
 V_i = velocidad del gas a la entrada m/s
 N_h = número de cabezas de velocidad
 a = ancho del ducto a la entrada m
 b = altura del ducto a la entrada m
 De = diámetro del tubo de salida m

es decir la caída de presión es proporcional al cuadrado de la velocidad de entrada y es directamente proporcional a la relación de las áreas de entrada y salida.

2. COLECTORES ELECTROSTÁTICOS

Los precipitadores electrostáticos son equipos de alta eficiencia aplicables a una gran diversidad de procesos y distribución de partículas y ha sido utilizada desde 1906 para separación de neblinas de ácido sulfúrico y comercialmente a gran escala desde 1910 para colectar vapores de zinc y plomo de una corriente de 250000 pies cúbicos por minuto.

En la actualidad maneja gastos de 100 a 4,000,000 de pies cúbicos por minuto para rangos de partícula de 0.05 a 200 μ con rangos de eficiencia de 80 a 99%, caídas de presión de 0.1 a 0.5 pulgadas de agua, y presiones máximas de 150 Psi.

La precipitación electrostática utiliza como fuerza conductora, la fuerzas que actúan en las partículas cargadas eléctricamente en la presencia de un campo eléctrico, y su proceso consiste de 4 pasos básicos:

- 1) Carga eléctrica de las partículas por ionización
- 2) Transporte de la partícula cargada a superficies colectoras por una fuerza externa
- 3) Neutralización de la partícula cargada eléctricamente en la superficie colectoras y:
- 4) Remoción de las partículas precipitadas de la superficie colectoras a una tolva colectoras

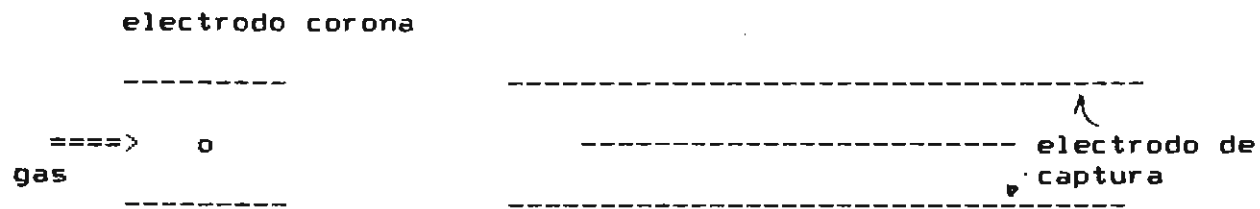
1) Cargado de las partículas

La carga de las partículas se logra haciendo pasar una corriente de gases y partículas a través de un sistema de electrodos diseñados para favorecer la producción de una descarga corona, cuando están energizados con una fuente de alto voltaje, la cual generalmente es unidireccional, la corona genera iones que al entrar en contacto con las partículas, se adhieren a las mismas cargándolas eléctricamente, la carga de las partículas al nivel máximo posible ocurre en menos de un décimo de segundo, mientras que la corriente gaseosa y de partículas esta sujeta a un campo eléctrico durante varios segundos.

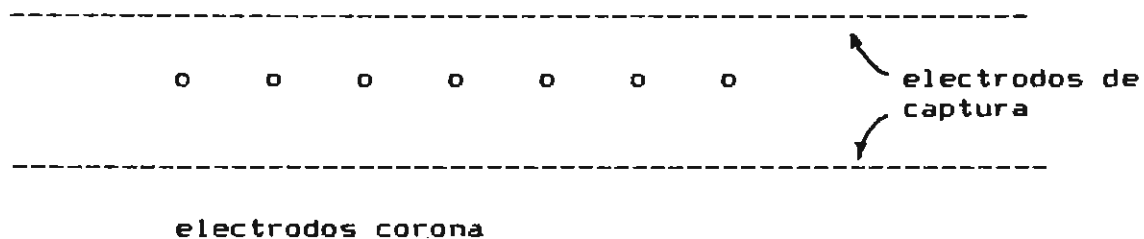
Existen diferentes sistemas de electrodos para lograr la carga de las partículas y la posterior deposición:

- a) sistemas de dos etapas
- b) sistemas de una sola etapa

a)



b)



El primer tipo se utiliza en aplicaciones de acondicionamiento de aire o limpieza de cuartos pequeños con bajas concentraciones (100 mg/ m³), mientras que el segundo tipo se utiliza para aplicaciones industriales que involucran grandes gastos y concentraciones.

Si existe una fuente de iones, el número de cargas que una partícula esférica dieléctrica puede obtener es:

$$n_s = E_0 r^2 / e [1 + 2 (K-1 / K+ 2)]$$

n_s = número de saturación de cargas en una partícula

E_0 = intensidad del campo eléctrico

r = radio de la partícula

e = carga eléctrica = 4.8×10^{10} esu

K = constante dieléctrica (para minerales $K=1$ a 10 ; para agua $K = 80$)

Se pueden cargar hasta tres veces esta carga como máximo, aun cuando raramente ocurre lo anterior, así por ejemplo con un campo de precipitación de 4500 volts/ cm, una partícula de 1μ de diámetro adquiere una carga del orden de 250 cargas eléctricas, mientras que una partícula de 10μ adquiere 25000 cargas eléctricas.

El máximo número de cargas es independiente del tiempo, dependiendo de la velocidad a la cual se carga; un precipitador crea cerca de 10^8 a 10^9 iones / centímetro cúbico indicando que las partículas se cargan en 0.1 segundos o menos

Las cargas también se acumulan sobre las partículas debido a difusión térmica de los iones en el gas, dependiendo de la movilidad del ión, el tiempo y es significativa para partículas menores a 1 μ de diámetro.

La fuerza electrostática en una partícula de 10 μ de diámetro es alrededor de 300 veces la fuerza gravitacional para una partícula de densidad unitaria, la magnitud de estas fuerza directamente sobre las partículas hace que los precipitadores tengan alta eficiencia y a diferencia de los colectores mecánicos no se requiere incrementar la velocidad.

2) transporte de las partículas
cuando una partícula cargada se coloca en un campo eléctrico, experimenta una fuerza F_e y el movimiento resultante para la región de Stokes VTE se obtiene igualando la fuerza electrostática a la fuerza de arrastre:

$$ne E = 3 \pi \mu V d / Ce$$

$$\text{o bien } VTe = ne E Ce / 3 \pi \mu d$$

o en términos de movilidad mecánica:

$$VTE = ne E B$$

la cual se puede expresar en términos de movilidad eléctrica Z como;

$$Z = VTE / E = ne Ce / 3 \pi \mu d \quad [\text{cm}^2/\text{sT V}]$$

y ambas mobilities se pueden relacionar como

$$Z = ne B$$

para partículas mayores de 1 μ de diámetro, la carga total es

$$ns e = D Eo r^2$$

por lo que sustituyendo se obtiene la velocidad de migración final

$$VTE = D Eo Ep r / 6 \pi \mu$$

$$VTE = \text{velocidad de migración cm / s}$$

Eo = campo eléctrico de carga efectiva
pico esu/cm

Ep = campo eléctrico promedio en el
electrodo colector esu/cm

r = radio de la partícula cm

μ = viscosidad del gas (poise)

La eficiencia de un precipitador electrostático se calcula de acuerdo con la ecuación de Deutsch:

$$E = 1 - e^{-A w/Q}$$

en donde:

A = área de los electrodos de captura

w = VTS velocidad de transporte

Q = gasto

esta ecuación se usa para estimaciones de eficiencia y dado que w es función del diámetro es necesario estimar eficiencias globales, de acuerdo con la ecuación nunca se alcanza una eficiencia del 100%, dado que A, w y Q son finitos y la ecuación es exponencial, la ecuación de Deutsch sirve sólo para predicciones y será necesario ajustarla experimentalmente en cada caso, por ejemplo Selzler y Watson proponen la siguiente ecuación empírica tipo Deutsch para plantas de energía en donde se utilizan combustibles con azufre:

$$E = 100 \{ 1 - \exp[-K(A/V)^{1.4} (KW/V)^{0.6} (S/AH)^{0.22}] \}$$

A= área de colección

KW= potencia en el electrodo de descarga (Kilowatts)

S/AH= relación azufre/cenizas en peso; K= 116 para carbón pulverizado K = 90 para hornos tipo ciclón

V= gasto [pies cúbicos/minuto]

En la ecuación general se puede observar que para un precipitador de dos placas colectoras de longitud L, altura H y espaciamiento entre platos d, el gasto se puede expresar como:

$$Q = Hd v$$

d= distancia entre placas

H= altura de la placa

v= velocidad del gas

y se tiene que:

$$E = 1 - \exp^{-(A/Q W)} = 1 - \exp^{-(2LHW / Hd v)}$$

por lo que se observa que la eficiencia se puede incrementar si se reduce el espacio entre las placas colectoras, se incrementa la longitud, se reduce la velocidad o se incrementa la velocidad de transporte, para optimizar un diseño será necesario tomar en consideración criterios económicos.

si la velocidad se expresa como:

$$v = L/t \quad t = \text{tiempo de residencia}$$

$$E = 1 - \exp^{-(2tW/d)}$$

De las ecuaciones anteriores, se pueden esperar los siguientes efectos:

1. La velocidad de migración W esta directamente relacionada con la intensidad del campo, lo cual implica que operar al máximo voltaje en el electrodo corona sin una cantidad excesiva de cenizas sobre el, es muy importante en términos de eficiencia.
2. La velocidad de migración disminuye cuando el diámetro disminuye, lo cual implica que la eficiencia baja para partículas pequeñas, aun cuando el precipitador alcanza altas eficiencias en el rango submicrónico.
3. La velocidad de migración disminuye cuando la viscosidad aumenta, lo que implica que se tendrán mejores eficiencias a bajas temperaturas
4. La velocidad de migración esta relacionada con un factor dependiente de las propiedades eléctricas de los materiales suspendidos, específicamente la resistividad de las partículas es muy importante.

La resistividad óptima para que la precipitación electrostática sea eficiente, se encuentra en el rango de 10^4 a 10^{10} ohm.cm y dado que la mayoría de las partículas no se encuentran en este rango, es necesario acondicionar el gas, lo cual se obtiene a través de modificar la humedad y la temperatura, reduciéndose la resistividad con aumentos en la humedad a diferentes temperaturas, comportándose con respecto a esta última en forma parabólica con un máximo para polvo seco a 300 grados Kelvin, reduciéndose en los extremos en ambas direcciones.

Otro enfoque para modificar la resistividad es la adición de agentes acondicionantes, tales como pequeñas cantidades de SO_3 y NH_3 , en el orden de 0.4%, los cuales actúan como electrolitos al adsorberse en las partículas, reduciendo drásticamente la resistividad.

Las partículas depositadas son removidas de los colectores de captura a través de vibración y rascado, cuando son partículas líquidas las colectadas, éstas se coagulan y caen por gravedad al fondo del colector, el rascado generalmente ocurre cuando los depósitos de partículas alcanzan capas de $1/8$ a $1/4$ de pulgada perdiendo aquellas junto al colector la carga, por lo que es posible el desprendimiento, evitando realizar éste cuando existan velocidades cercanas al colector que pudieran redepositar las partículas antes de caer a la tolva recolectora.

finalmente los siguientes factores influyen en la operación de los precipitadores:

- 1) Gas
 - densidad
 - composición
 - temperatura
 - viscosidad
 - velocidad y distribución de la velocidad
- 2) Partículas
 - tamaño
 - forma
 - concentración
 - resistividad eléctrica
 - gravedad específica
 - propiedades de superficie
- 3) Electrodo de descarga y colectores
 - perfil de los colectores receptores
 - perfil de los electrodos de descarga
 - espaciamiento de los electrodos de captura
 - espaciamiento de los electrodos de descarga
 - deposición del polvo en los electrodos de captura
 - deposición del polvo en los electrodos de descarga
 - alineación del sistema de electrodos
 - reingreso de las partículas causado por los mecanismos utilizados para remover el polvo depositado
 - mecanismos usados para la remoción
- 4) Sistema eléctrico
 - intensidad del campo
 - corriente en la corona
 - tamaño de la sección de energización para cada unidad rectificadora de alto voltaje
 - polaridad de la corriente directa
 - diseño del rectificador

3. LAVADORES HÚMEDOS

En un colector húmedo, un líquido el cual generalmente es agua se usa para capturar las partículas o para incrementar el tamaño de estas a través de coagulación, en ambos casos el tamaño resultante provoca que la partícula se remueva de la corriente gaseosa.

Este tipo de equipos captura partículas en el rango de 0.1 a 20 μ de diámetro utilizando como mecanismos la impactación inercial sobre una gota, la intercepción y la difusión sobre la fase líquida, la cual generalmente es dispersada finamente para lograr un buen contacto entre la fase líquida y el aerosol.

Los lavadores húmedos que tienen un uso industrial son fundamentalmente:

- 1) cámaras de aspersión
- 2) ciclones húmedos
- 3) venturis de alta energía

Parámetros de diseño.

Si se define un número de impactación (similar al número de Stokes) como:

$$N_i = X_s / D_d$$

N_i = número de impactación
 X_s = distancia de paro
 D_d = diámetro de la gota

en donde

$$X_s = V_{p,o} D_p^2 \rho / 18 \mu g$$

para: $V_{p,o}$ = velocidad relativa del gas a la partícula
 D_p = diámetro de la partícula

o sustituyendo para N_i :

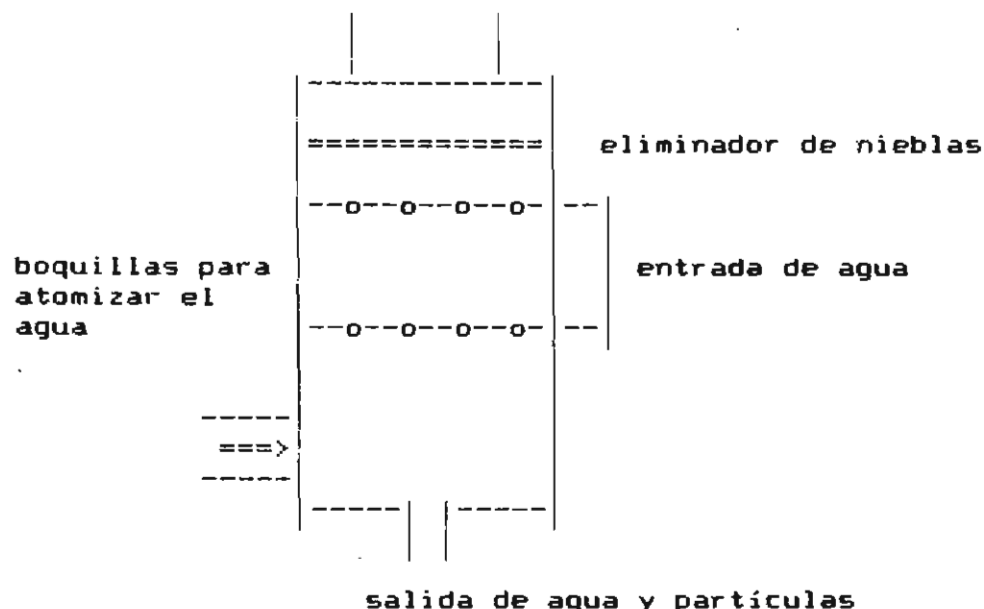
$$N_i = V_{p,o} D_p^2 \rho K_c / 18 \mu g D_d = D_p^2 \rho K_c (U_p - U_d) / 18 \mu g D_d$$

K_c = factor de Cunningham
 U_p = velocidad de la partícula
 U_d = velocidad de la gota

Generalmente, la eficiencia se incrementa cuando N_i se incrementa, y N_i es directamente proporcional a $V_{p,o}$, velocidad que varía con el tamaño de la gota, en un venturi de alta energía, las partículas de menor diámetro son más fácilmente aceleradas que las de mayor diámetro, incrementando la velocidad y la eficiencia.

En las cámaras de aspersión por su parte, dado que actúan fuerzas gravitacionales, la velocidad terminal de asentamiento es mayor para diámetros más grandes y por consiguiente la velocidad relativa entre la partícula y la gota también se incrementa, con su efecto en la eficiencia.

Cámaras de aspersión



La relación de agua con respecto a la cámara, esta en el rango de 2 a 10 galones por minuto de agua por cada 1000 pies cúbicos por minuto de gasto, reciclándose el agua, previa filtración para no tapar las boquillas en donde se atomiza, las cuales deben de cubrir toda el área de la cámara con los conos de atomización.

La caída de presión en este tipo de equipo es de 1 a 2 pulgadas de agua, con eficiencias de colección altas para partículas mayores de 10μ de diámetro, en rangos de 94% para partículas de 5μ y 99% para aquellas mayores de 25μ , incrementándose la eficiencia si se instalan mamparas de 94% a 97% y de 99% a 100% respectivamente. Se pueden obtener altas eficiencias para partículas menores si se usan nieblas atomizadas con altas presiones, sin embargo la potencia requerida y la posibilidad de que se tapen las boquillas es una posible desventaja.

Ciclones húmedos

Los ciclones húmedos se pueden construir a partir de ciclones secos a los que se les colocan bancos de espumas, actuando las gotas en el vórtice exterior y las partículas son impulsadas hacia las paredes húmedas del ciclón, en donde son removidas.

La circulación de agua va de 1 a 8 gal/ 1000 pies cúbicos de gas a tratar, con caídas de presión que varían entre 1 a 4 pulgadas de agua, dependiendo éstas del arreglo interno del equipo, con eficiencias cercanas al 100% para gotas de 100μ y más y 99% para

gotas entre 50 a 100 μ y de 90 a 98% para gotas entre 5 y 50 μ , generalmente los ciclones húmedos se utilizan en serie con venturís de alta energía.

Venturís de alta energía

Un venturi es un canal rectangular o circular que converge a una sección o garganta estrecha y luego diverge a una sección de un área similar a la inicial, en la garganta la energía cinética del flujo se incrementa con reducciones en la energía estática para mantener constante la presión total, con un incremento resultante de la velocidad del gas, la cual alcanza velocidades de 50 a 80 m/s.

Generalmente, la relación entre las áreas de entrada y la garganta es de 4:1, con ángulos de divergencia entre 5 a 7 grados para una recuperación suave de la presión estática.

La acción de lavado y remoción de las partículas ocurre a través de la introducción del agua en la garganta o al principio de la sección convergente en donde la velocidad relativa partícula-gota es máxima y en donde además debido las altas velocidades contribuyen a la atomización de las gotas e incrementando el área de contacto.

Experimentalmente se ha demostrado que la aceleración de las partículas es función de su diámetro, y que la gota alcanza el 90% de la velocidad del gas en poca distancia por lo que la impactación ocurre en la primera parte de la sección convergente.

Dado que la energía alcanzada en la garganta se utiliza para acelerar la partícula y atomizar el líquido, la caída de presión que se alcanza en estos equipos son muy altas en comparación de los equipos secos, existen diversas ecuaciones para calcular la caída de presión, Calvert y otros basados en un modelo en el cual se asume que:

- 1) la velocidad del gas en la garganta U_g es constante
- 2) el flujo es unidimensional, incompresible y adiabático
- 3) la fracción líquida en el flujo es pequeña en cualquier área
- 4) la evaporación de la gota es despreciable y D_d es constante y:
- 5) las fuerzas sobre la gota son simétricas y por consiguiente se anulan

encontró las siguientes ecuaciones para calcular la caída de presión:

$$P_1 - P_2 / \frac{1}{2} \rho U_g^2 = 4 \left(1 / \rho \right) (Q_l / Q_g) [1 - m^2 + (m^2 - m^2)^{0.5}]$$

en donde $\frac{1}{2} \rho U_g^2$ = una cabeza de velocidad

Si el venturi es lo suficientemente largo para que U_{d1} alcance a U_g se obtiene:

$$P = P_2 - P_1 = - \frac{1}{2} \rho U_g^2 (Q_l / Q_g)$$

que expresada en cabeza de agua:

$$P = - 1.02 \cdot 10^{-3} U_g^2 (Q_L/Q_g)$$

en donde P [cm agua]
 U_g [cm/s]
 Q_L, Q_g en la mismas unidades

otra ecuación obtenida por correlación de datos experimentales obtenida por Hesketh es la siguiente:

$$P = V_{g,t^2} g (A)^{0.133} (0.56 + 0.125L + 2.3 \cdot 10^{-3} L^2)$$

P = caída de presión [pulgadas de agua]
 g = densidad del gas
 A = área seccional de la garganta
 L = relación líquido/gas [gal/1000 pies³]

las ecuaciones anteriores son las más utilizadas para el cálculo de la caída de presión.

Con respecto a la eficiencia Calvert, estableció la siguiente ecuación para el cálculo de la penetración

$$P_t = \exp [-6.1 \cdot 10^{-11} (1 + p K_c d_p^2 f^2 P / \mu g^2)]$$

en donde f es un coeficiente experimental que varía de 0.1 a 0.4

Hesketh en base a el análisis de datos experimentales concluyó que para partículas menores a 5μ de diámetro para las cuales se tiene una eficiencia cercana al 100% de remoción, la penetración se puede calcular como:

$$P_t = C_o/C_i = 3.47 (P)^{1.43}$$

C_i = concentración en peso de partículas menores de 5μ de diámetro en el venturi
 C_o = concentración en peso de partículas menores de 5μ a la salida
 P = caída de presión en pulgadas de agua

La circulación de agua en un venturi varia entre 2 a 12 gal/1000 pies³ con caídas de presión entre 3 a 100 pulgadas de agua, en donde la eficiencia esta relacionada con la caída de presión, con eficiencias de 99% para partículas en el rango submicrónico y 99.5% para 5μ de diámetro.

Como se mencionó, generalmente estos equipos trabajan en paralelo con separadores ciclónicos a la salida, en la actualidad se esta ivestigando como hacer más eficiente el uso de la energía utilizada en estos equipos, tales como el lavador electrostático tipo venturi de

baja energía, en donde la fuerza electrostática se suma a las fuerzas inerciales que opera el venturi; el venturi que utiliza vapor para mover el gas en el sistema e incrementar la eficiencia a través de condensación y otros.

SISTEMAS DE FILTRACIÓN

Filtración es el método mas antiguo para remover material suspendido en una corriente de gases, basándose en hacer pasar un aerosol unidireccionalmente a través de un material filtrante poroso, en el cual se atrapan las partículas.

El medio filtrante se puede clasificar como:

- 1) Materiales fibrosos (filtros fijos)
- 2) Filtros de tela o tejidos de tela con sistemas de limpieza en línea

Los materiales filtrantes mencionados capturan el polvo a través de los siguientes pasos:

- 1) Las partículas son separadas debido a un efecto de cribado de el medio filtrante, dado que cualquier medio filtrante tiene un diámetro de poro específico, en donde todas las partículas mayores a ésta son atrapadas.
- 2) Las partículas son separadas debido a fuerzas inerciales: impactación, intercepción y difusionales: difusión, como resultado de los diversos cambios de dirección a través del material.
- 3) Frecuentemente existen también cargas electostáticas sobre las partículas, lo que incrementa la deposición en la partículas pequeñas
- 4) Las partículas en el rango submicrónico, más pequeñas que los diámetros de poro del material se depositan con una eficiencia alta sobre las capas de polvo depositadas (pastel) sobre y dentro del material filtrante, una vez que la capa se forma, la filtración ocurre en la capa del material depositado, incrementando significativamente la eficiencia de captura inicial e incrementando la caída de presión con respecto a un filtro limpio hasta un nivel que requiere que el pastel sea removido debido a las limitaciones del ventilador, para que funcione correctamente el filtro la caída de presión recomendada varía entre 10-15 centímetros de agua, la limpieza se lleva a cabo IN SITU, dado que el área de filtración es muy grande y el tiempo de limpieza es muy corto para que se lleve a cabo reemplazando el filtro o cambiándolo.

Desde el punto de vista industrial el único sistema de filtración aplicable al control de partículas es el de filtros de bolsas, las cuales generalmente son fieltros de diferentes materiales o bien telas tejidas, siendo éstas últimas las más usadas en el presente, debido a la aparición de nuevos materiales sintéticos que pueden tolerar condiciones extremas de operación tales como altas temperaturas, atmósferas corrosivas y otras.

Modos de operación

De acuerdo con el modo de operación los filtros se clasifican como:

- a) intermitente
- b) continua

la operación intermitente se utiliza en procesos que generan cantidades pequeñas de contaminantes tales como operaciones de esmerilado, pulido, molienda en donde se producen partículas grandes, este tipo de equipos consisten en unidades integradas del filtro y el ventilador, cuando se depositan los materiales, generalmente salen de operación y se limpian externamente.

Los equipos de operación continua, se utilizan grandes procesos, en donde se generan altas concentraciones de partículas de diferentes diámetros y consisten en filtros en compartimentos paralelos, en donde cuando uno se satura, sale de operación y entra a un ciclo de limpieza, mientras opera otro compartimento.

Desde un punto de vista sistémico, un sistema de filtración consiste en un equipo que tiene un medio filtrante, ducteria, un equipo de movimiento de aire, aditamentos para sostener el filtro en la corriente gaseosa, un sistema de limpieza periódica, un sistema de recepción del material colectado e instrumentación y control del proceso de limpieza siendo sus elementos más importantes:

- a) material filtrante
- b) mecanismo de limpieza

a) material filtrante

En general el material filtrante usado en el control de partículas de origen industrial se puede clasificar como:

- a) material fibroso
- b) filtros de textiles o de tela

El material fibroso es una colección de fibras libres empacadas dentro de un contenedor para formar un filtro, dependiendo sus dimensiones de el contenedor, este tipo de materiales no pueden ser limpiados en el lugar, por lo que una vez que han sido saturados de partículas con un incremento en la caída de presión es necesario reemplazarlos por lo cual su uso en la industria es limitado solo a procesos intermitentes de bajos gastos y concentraciones.

un filtro de tela (fabric filter), implica el uso de una tela tejida como material filtrante, compuesta de muchas fibras individuales combinadas para producir una hoja plana de propiedades medibles tales como: longitud, ancho, espesor, resistencia a la tensión, fatiga a la flexión, resistencia al rompimiento y otras.

Siendo de dimensión semipermanente, ya que las propiedades mecánicas de la tela permiten que esta pueda ser cortada y cosida en diferentes formas como bolsas o fundas, que pueden resistir distorsiones por sacudimiento y por consiguiente pueden ser limpiadas en línea.

si se define una densidad de empaque de la fibra α , como la fracción del volumen total ocupado por la fibra

$$\alpha = mf / f L$$

α =densidad del empaque (adimensional)
 mf =densidad superficial del filtro [m/a]
 f =densidad de la fibra [masa/volumen]
 L =espesor del filtro [longitud]

para materiales fibrosos, α es del orden de 0.1 o menos, ofreciendo una baja resistencia al flujo, mientras que para materiales textiles α tiene valores de 0.2 a 0.3 y por consiguiente debe de operar a menores velocidades de filtración en donde:

V_f = gasto total de flujo a través del filtro/ área del filtro

con velocidades de filtración V_f para materiales fibrosos en el rango de 0.1 a 3.0 m/s y V_f para telas con un máximo de 0.05 m/s con rangos de operación para filtros utilizados en fuentes de combustión de 0.005 a 0.02 m/s

Existen otros materiales filtrantes tales como: lechos granulares de arena, filtros de membrana de polímeros sólidos bombardeados nuclearmente y filtros de papel, estos últimos tienen semejanzas con filtros de tela, pero generalmente son más cortos y no resisten temperaturas extremas, sin contar además con una densidad uniforme.

Los filtros de tela tienen las siguientes propiedades:

- 1) La estructura de la tela en la cual las fibras están soportadas en una posición fija formando láminas de fibras con alta cohesión lo que incrementa sus propiedades mecánicas a la tensión, flexión y otras.

- 2) Un diámetro de poro grande comparado con las partículas filtradas, aun cuando menor que una criba.
- 3) Relativamente bajas velocidades de filtración
- 4) Capacidad de regenerarse IN SITU a través de diversos mecanismos: sacudimiento mecánico, flujo reverso etc>

El material filtrane por el origen puede ser:

- a) fibras naturales
 - 1) fibras celulosicas: algodón, lino, yute, ixtle, henequén, palma coco, etc
 - 2) fibras proteínicas: lana, alpaca, camello, angora, etc.
 - 3) fibras minerales: asbestos
 - 4) hule natural
- b) fibras sintéticas :
 - a) celulosicas: rayón, acetato y triacetatos
 - b) nylon
 - c) olefinicas: polietileno, polipropileno, etc.
 - d) Poliester
 - e) acrílico y modacrílico: acrilán, orlón, dynel, etc.
 - f) Inorgánicas: cuarzo, silica grafito, boro, etc.
 - g) Teflón
 - h) base mineral: fibra de vidrio, cromo, fierro, asbestos, etc.

Las temperaturas de operación varían de acuerdo con la naturaleza del material con rangos de hasta 85 grados centígrados para algodón o lana, hasta 225 grados centígrados para fibra de vidrio, materiales que resisten altas temperaturas pueden aplicarse en procesos que de otra manera necesitarían un acondicionamiento de los gases con el alto costo asociado.

La selección final del material filtrante depende de la composición química, la temperatura y la humedad del gas así como de la composición física y química de la partícula.

b) mecanismos de limpieza:

Los mecanismos de limpieza están relacionados con el sistema de alimentación del gas, clasificándose en términos de este último como:

- a) Unidades alimentadas por el fondo, en donde el gas ingresa por el fondo a través de la tolva de recepción y va al interior de la bolsa, removiéndose parte de las partículas sin alcanzar el medio filtrante.
- b) Unidades alimentadas por el techo, en donde el gas entra por el techo de las bolsas y:
- c) Alimentación externa: en donde el gas ingresa de manera ascendente o descendente a los filtros cuyo interior esta limpio, con este arreglo la tela puede ser construida como bolsas o fundas.

Los métodos de limpieza se clasifican como:

- a) Flexión de la tela:
 - 1. mecánica (sacudimiento)
 - 2. sónica
 - 3. colapsante
 - 4. chorro a presión
- b) Flujo reverso
 - 1. chorro reverso a presión
 - 2. flujo reverso

a) Flexión de la tela

El sacudimiento mecánico, utiliza un sistema mecánico de vibración, que produce un movimiento desde el techo de la bolsa generando un movimiento horizontal y/o vertical que puede ser usado simultáneamente con un rascado de las bolsas para facilitar la remoción.

La limpieza sónica utiliza vibraciones de sonido para romper el pastel formado en la tela, generando las ondas sonoras a baja frecuencia por medio de cornetas de aire instaladas a lo largo de las bolsas.

Los sistemas colapsantes consisten en crear pequeños gradientes negativos de presión los cuales actúan en forma reversa de la sección sucia a la sección limpia causando que el filtro se colapse y se desprendan las partículas depositadas.

Los sistemas de chorro a presión consisten en inyectar en el techo del filtro una burbuja de aire a presión la cual al viajar a lo largo del material provoca que este se flexione y/o se colapse, desprendiéndose el material depositado.

b) Flujo reverso

El mecanismo de chorro reverso a presión, consiste en emplear un chorro pequeño de aire a alta velocidad en forma reversa, desprendiendo el material, este tipo de sistema puede operar continuamente, con una presión diferencial a través del sistema constante.

El limpiado por flujo reverso, consiste en utilizar aire en forma externa a presión atmosférica o a bajas presiones, para limpiar el filtro por desprendimiento del material, en unidades que en ese momento están en el ciclo de limpieza, este mecanismo y el sacudimiento mecánico son los más utilizados en la industria.

CRITERIOS DE DISEÑO

Tamaño del sistema

Las unidades de filtros de bolsas son generalmente grandes por lo que habría que considerar limitaciones de espacio y altura, el tamaño de la bolsa dependerá del área requerida de material filtrante, la cual se obtiene de la velocidad de filtración utilizada, que dependerá del material filtrante utilizado, así como de las relaciones de longitud a diámetro empleada, el espaciamiento entre bolsas y las limitaciones de altura.

Los filtros de bolsas consisten de tubos cilíndricos, colocados en múltiples filas para proporcionar grandes superficies para el paso del gas, con eficiencias de colección del orden del 99% para partículas de 0.5μ y eficiencias altas para partículas de 0.01μ de diámetro.

la siguiente tabla muestra algunas relaciones recomendadas para una unidad de 1000 pies cúbicos por minuto de gasto:

tipo de colector	Vf pies/min	Volumen del colector pies cúbicos	Área de piso pies cuadrados
flujo reverso	1.0	590	30 - 42
	2.0	295	15 - 21
sacudimiento mecánico	1.0	210 - 370	26 - 50
	3.0	70 - 123	8.7 - 16.9
chorro a presión	1.0	670	111
	10.0	67	11.1
tipo funda	1.0	210 - 340	21 - 59
	2.0	105 - 170	10.5 - 29.5

Los criterios de construcción recomendados son los siguientes:

tipo tubular:

diámetro: 5-6 pulgadas para sacudimiento mecánico
11½ - 12 pulgadas para altas temperaturas
9 - 20 pulgadas para flujo reverso

longitud: 5 a 30 pies

combinaciones típicas:

5 diámetro, 10-12 pies de longitud

6 diámetro con 14 - 20 pies de longitud

relación aire tela:

1:1 a 5:1

relación largo/ancho: 6 a 30 veces

espaciamiento entre bolsas:

un mínimo de 2 pulgadas es recomendada, con pasillos de 18 pulgadas de ancho entre cada 8 bolsas y si estas son muy largas, se deben instalar pasillos en dos niveles para facilitar la limpieza.

velocidad de filtración:

sacudimiento mecánico: 0.6 a 1.0 m/min

flujo reverso: 2 a 4 m/min

chorro a presión reverso: 2 a 5 m/min

Ecuaciones de diseño

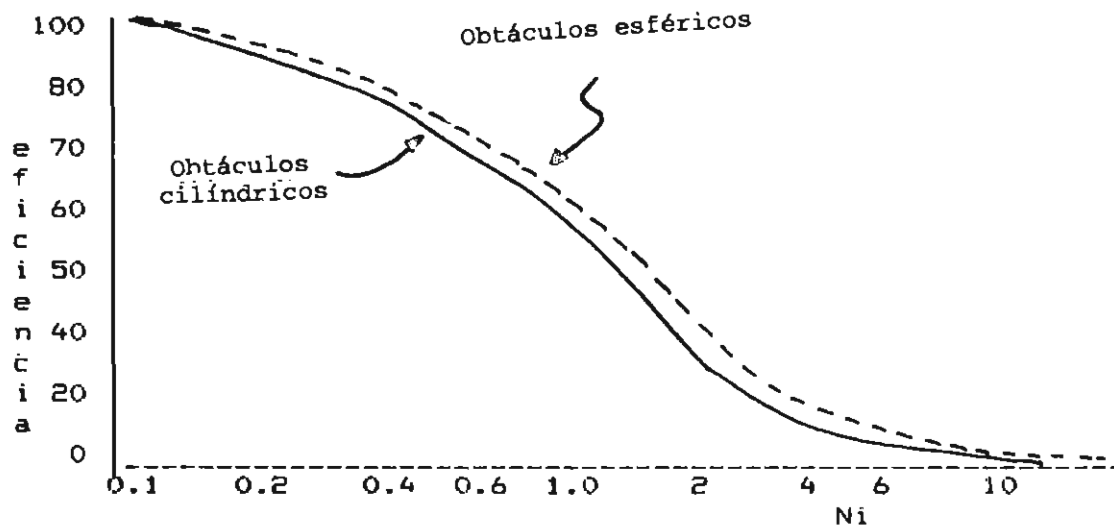
La eficiencia es función del número de impactación:

$$N_i = V_p d_p^2 \rho K_c / 18 \mu g d_f$$

para: d_f = diámetro de la fibra

K_c = constante de Cunningham

la siguiente gráfica muestra la correlación de N_i versus eficiencia para algunos blancos tales como esferas y cilindros:



Caída de presión

la caída de presión a través de la tela se incrementa de una caída de presión residual para la tela limpia, a la caída de presión producida por la tela y el pastel, incrementándose al mismo tiempo la resistencia al flujo.

Para una tela relativamente limpia la caída de presión es de aproximadamente de ½ pulgada de agua (1.2 mbar) y la eficiencia de remoción es baja, incrementándose a una caída de presión de 2 a 3 pulgadas de agua cuando esta formado el pastel y con eficiencias de colección superiores al 99%. Cuando la caída de presión alcanza valores de 5 a 6 pulgadas de agua es necesario limpiar el filtro.

La caída de presión total es la suma de la del filtro limpio más la del pastel y si el flujo a través de la tela y la capa de polvo se asume viscoso, la caída se puede representar con la siguiente ecuación de Darcy:

$$P / x = V \mu g / K$$

en donde K = permeabilidad del filtro $[L^2]$
 V = velocidad superficial del gas = Q/A
 x = espesor de la capa de polvo o espesor de la tela

K es un parámetro que generalmente se obtiene experimentalmente, dado que depende de muchos factores tales como la porosidad, la superficie específica, la distribución de tamaño de poro, la distribución de tamaño de partícula y otras.

La caída de presión total P , se puede escribir en función de la ecuación de Darcy como:

$$P = P_f + P_p = x_f \mu g V / K_f + x_p \mu g V / K_p$$

dado que P_f permanece constante, la caída de presión es función de el pastel de polvo formado durante la filtración, siendo fundamentalmente una función de la permeabilidad del polvo y del espesor de la capa, el cual es una función del tiempo de operación para una velocidad y viscosidad del gas constantes.

Si la masa colectada en función del tiempo se expresa como

$$\text{Masa colectada} = VA t L_d = p (A x_p)$$

para: A = área del filtro
 V = velocidad de filtración
 L_d = masa de polvo por unidad de volumen o carga de polvo
 t = tiempo de filtración
 p = densidad de la partícula

por lo que

$$x_p = V L_d t / p$$

y:

$$P_p = V^2 L_d t \mu g / K_p p$$

dado que la viscosidad del gas, la densidad de la partícula y la constante de permeabilidad son constantes para un gas y partícula específicos, éstos se pueden agrupar en un parámetro de resistencia R_p definido como

$$R_p = \mu g / p K_p$$

por lo que $P_p = R_p V^2 L_d t$

generalmente L_d y V permanecen constantes durante un ciclo de filtrado y se observa que la caída de presión varía linealmente con la carga de polvo, con el tiempo y el cuadrado de la velocidad, aun cuando ha sido reportado que es una función exponencial de la velocidad de filtración.

La relación de la caída de presión con la velocidad superficial se conoce como la resistencia del filtro S expresada en unidades de pulgadas de agua/ pies/ minuto

$$S = P_p / V = R_p V L dt$$

$$\text{si } W = \text{masa colectada/ área} = V A t L d / A = V L d t$$

se obtiene que: $S = R_p W$

con lo que se observa que S varía linealmente con W para condiciones dadas una vez que se empieza a formar la capa de polvo, de igual manera se observa que aun después de ser limpiado el filtro queda una cantidad pequeña de polvo en él con una resistencia residual S_r del orden del 5 al 10% $L d$, W después de la limpieza varía entre 20 a 50 g/m^2 y W al final del ciclo de limpieza alcanza valores del orden de 750 a 1000 g/m^2 , valores de S_r varían de 0.2 a 0.8 pulgadas de agua/pie/minuto para una tela con un polvo retenido mínimo.

finalmente, los sistemas de filtración tienen las siguientes ventajas:

- 1) alta eficiencia de colección sobre un rango amplio de tamaño de partícula
- 2) flexibilidad en el diseño en función del material filtrante disponible
- 3) amplia capacidad de manejo de volúmenes en rangos de 100 a 5 millones de pies cúbicos / minuto
- 4) caídas de presión razonables así como cantidad de energía requerida
- 5) posibilidad de manejar diversos materiales sólidos.

como desventajas se pueden mencionar:

- 1) altas necesidades de espacio
- 2) riesgos de explosiones si existen chispas en la corriente
- 3) restricciones en el manejo de materiales hidróscopicos.

APLICACIONES

Como un criterio general, los equipos más utilizados en el control de partículas emitidas por industrias además de las aplicaciones mencionadas en los diferentes pintos tratados, se aplican en las siguientes condiciones:

Colectores mecánicos:

Las cámaras de asentamiento y ciclones se utilizan cuando:

1. el material a coleccionar es grueso
2. las concentraciones son muy altas
3. no se requieren altas eficiencias (prelimpieza)

Los Lavadores húmedos se usan cuando:

1. se requiere controlar partículas finas a alta eficiencia
2. enfriamiento de gases es deseable y la humedad relativa a la salida no es indeseable
3. Se requiere remover partículas y gases contaminantes
4. el uso del agua no es prohibitivo ni ésta se encuentra racionada

Los Precipitadores electrostáticos se recomiendan cuando:

1. se requieren coleccionar materiales finos con altas eficiencias
2. se requiere manejar altos volúmenes
3. se requiere recuperar material valioso

Los Sistemas de filtración son recomendables cuando:

1. se requieren altas eficiencias para materiales finos
2. se requiere recuperar material seco valioso
3. la corriente gaseosa se encuentra abajo de su punto de rocío
4. los volúmenes de gas son razonablemente bajos
5. las temperaturas de operación son relativamente bajas

Como se mencionó anteriormente, los colectores mecánicos se utilizan en: procesos de molienda, cribado, pulido, esmerilado y como prelimpieza en la industria del cemento, detergentes, celulosa y papel, fundición y otros.

Los lavadores húmedos se utilizan en: fundiciones, industria del hierro y acero, industria química, fundiciones de metales no ferrosos, industria petrolera, industria de productos minerales, plantas de fertilizantes, celulosa y papel y otros.

Los precipitadores electrostáticos se utilizan en: plantas de energía; industria del hierro y acero (plantas sinterizadoras, hornos de coque, altos hornos); la industria del cemento, la industria química, la industria metalúrgica de materiales no ferrosos, plantas incineradoras y otras.

Los sistemas de filtración son usados en: la industria del cemento; hornos de cubilote; industria del hierro y acero; hornos de metales no ferrosos; plantas de negro de humo y recientemente en plantas de energía con el desarrollo de medios filtrantes que resisten altas temperaturas.

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE EQUIPO DE CONTROL

PARÁMETROS A CONSIDERAR EN LA SELECCIÓN	PROPIEDADES TÉCNICAS DEL EQUIPO										PROPIEDADES DE LOS GASES							PROPIEDADES DE LAS PARTÍCULAS										
	TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN	CAIDA DE PRESIÓN	TAMAÑO MÍNIMO DE PARTÍCULAS QUE CAPTA	EFICIENCIA MÁX. PARA TAMAÑO MÍN. DE PART.	REQUERIMIENTOS DE ACCESORIOS	ESPACIO REQUERIDO	CONSUMO AGUA	HUMIDIFICA Y ENTRIA	SUFRE DAÑOS POR HUMEDAD	COLECTA GASES	REDUCE CONDICIONES EXPLORATIVAS	GASTO VOLUMÉTRICO	PRESIÓN	DENSIDAD	VISCOSIDAD	PUNTO DE ROCÍO	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	(2) CORROSIVIDAD	FLAMABILIDAD	CONCENTRACIONES ELEVADAS	DENSIDAD	HIDROSCOPÍA	TENDENCIA A AGLOMERARSE	ABRASIVIDAD	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	(2) CORROSIVIDAD	FLAMABILIDAD	
CELULÓN	390	50	40	85	B	Mo.	NO	NO	T	NO	NO	B	B	R.E.	R.E.	AI	-	AI	-	-	N.A.	M.E.	-	-	AI	AI	-	-
	390	150	15	85	B	Mo.	NO	NO	T	NO	NO	B	M	R.E.	R.E.	AI	-	AI	-	-	N.A.	M.E.	-	-	AI	AI	-	-
	430	180	10	94	M	Mo.	SI	SI	NO	SI	SI	S	M	R.E.	NO	-	-	AI	-	-	N.A.	M.E.	-	-	AI	AI	-	-
	400	200	15	95	M	M	NO	NO	T	NO	NO	M	M	R.E.	R.E.	AI	-	AI	-	-	N.A.	N.E.	-	-	AI	AI	-	-
PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO	180	12.5	0.5	90	A	O.	NO	NO	M.E.	SI	N.A.	-	B	-	R.E.	AI	M.E.	AI	N.A.	-	-	-	M.I.	-	M.E.	AI	N.A.	
	350	12.5	0.25	90	M.A.	M.G.	SI	NO	M.E.	SI	N.A.	-	B	-	R.E.	AI	M.E.	AI	N.A.	-	-	-	M.I.	-	M.E.	AI	N.A.	
COLECTOR DE BOMBAS	260	200	0.25	90	A	M.G.	NO	NO	T	NO	NO	-	M	-	-	AI	-	AI	-	-	-	-	AI	M.I.	AI	-	-	
	260	250	0.25	90	M.A.	M.G.	NO	NO	T	NO	NO	-	A	-	-	AI	-	AI	-	-	-	-	AI	M.I.	AI	-	-	
VENTILADOR HÚMEDO	-	150	1.0	88	A	Mo.	SI	SI	NO	SI	SI	A	M.A.	-	-	-	-	AI	-	-	-	-	-	M.I.	AI	-	-	
	-	3000	0.5	95	M.A.	Mo.	SI	SI	NO	SI	SI	A	A.T.	-	-	-	-	AI	-	-	-	-	-	M.I.	AI	-	-	
M.B. - Muy Bajo	N.A.	-	-	-	No Aplicable	Técnicamente	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
B - Bajo	M.I.	-	-	-	Mejora Eficiencia.	Recomendable	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
M - Medio	N.A.R.	-	-	-	No Aplicable por Riesgo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A - Alto	-	-	-	-	El Perímetro no Afecta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
M.A. - Muy Alto	-	-	-	-	Sin Límite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A.T. - Altísimo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

M.B. - Muy Bajo
B - Bajo
M - Medio
A - Alto
M.A. - Muy Alto
A.T. - Altísimo

N.A. - No Aplicable
M.E. - Mejora Eficiencia Recomendable
N.A.R. - No Aplicable por Riesgo
- Si Perímetro no Abierta
- Sin Límite

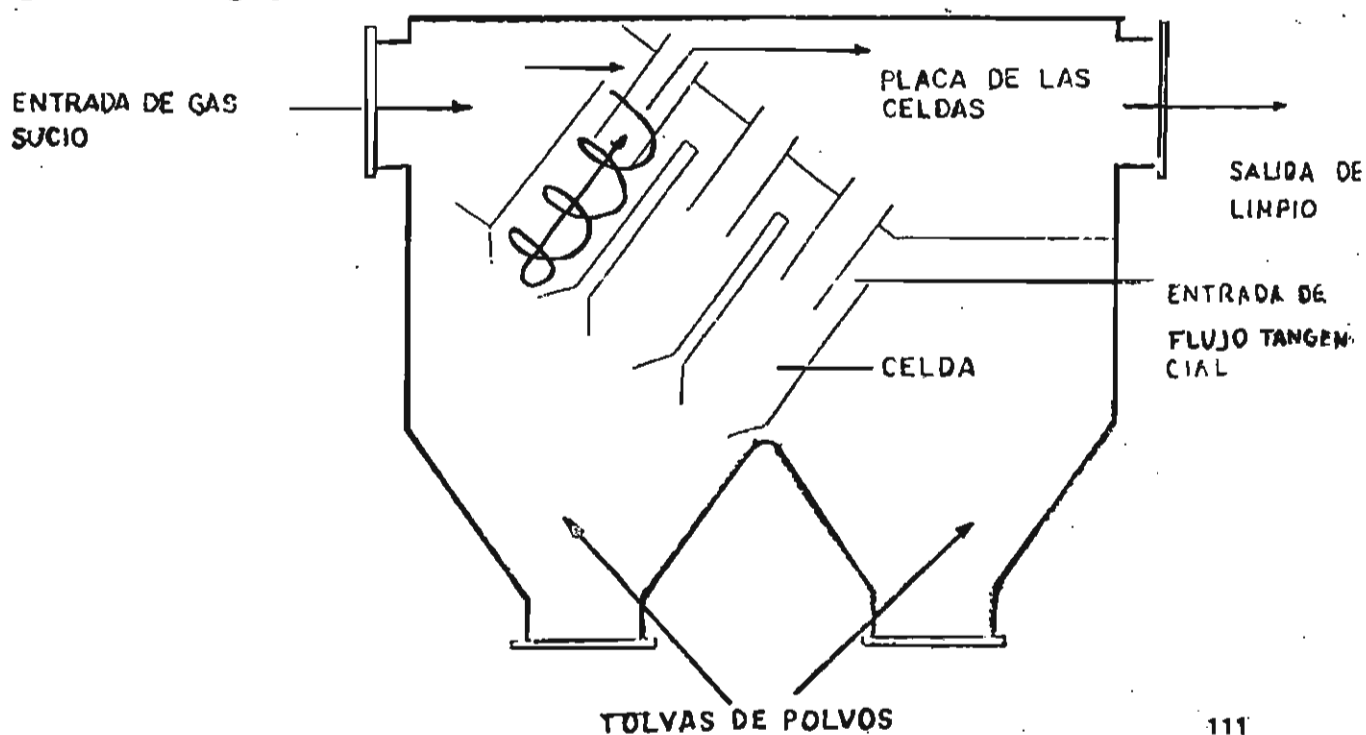
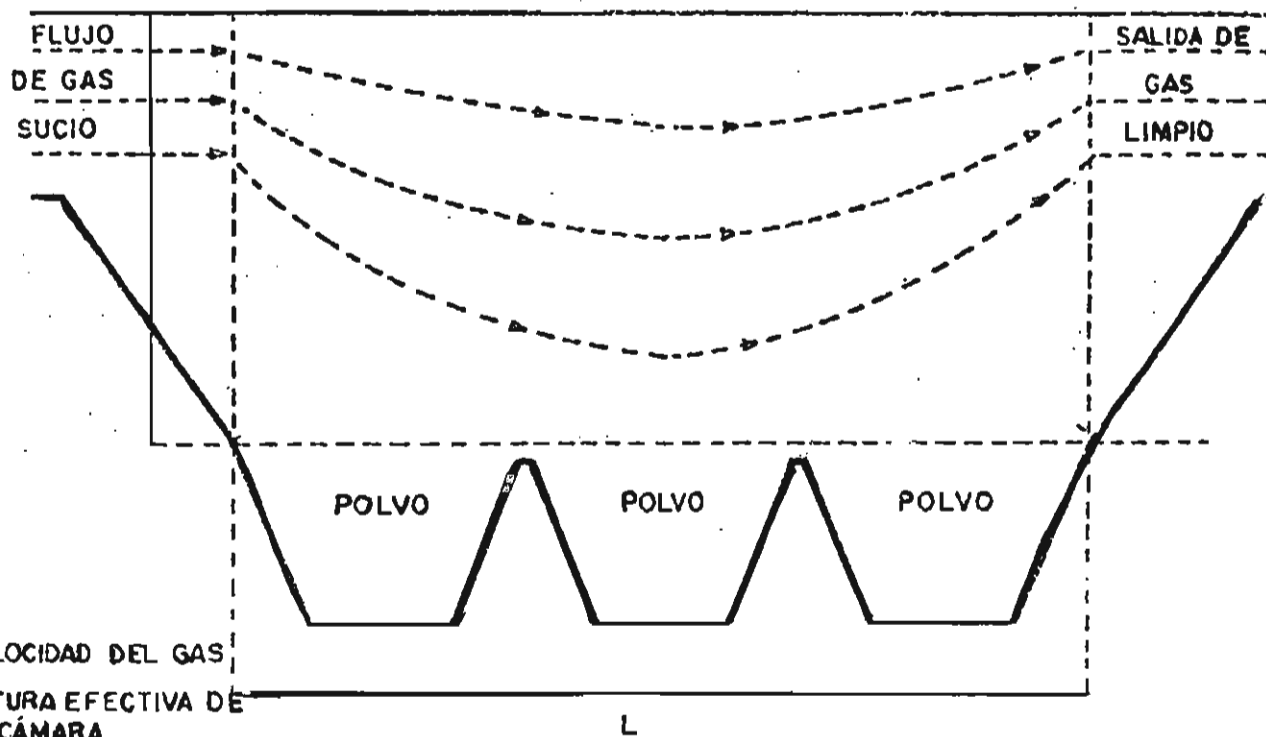
AI - Puede Ser Afectado al Equipo
R.E. - Reduce Eficiencia de Captación
T - Se Produce Taponamiento
NO - No Cumple con el Parámetro
SI - Si Cumple con el Parámetro

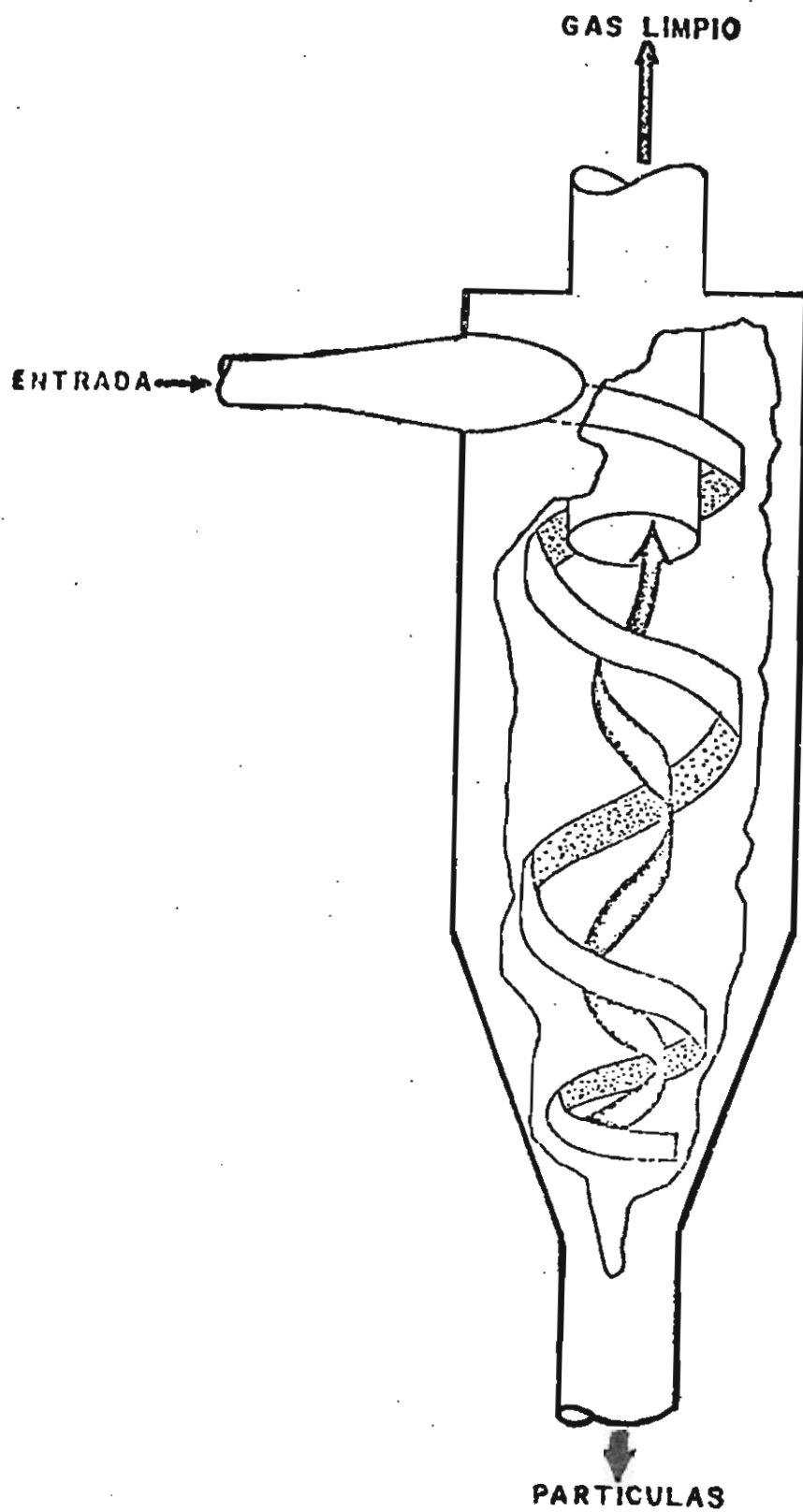
Mo. - Moderado
G - Grande
MG. - Muy Grande

(1) Para el tamaño mínimo de partícula que puede captar
(2) En presencia de corrosividad se requiere construcción especial

FUENTE: García W.J. "El uso de precipitadores electrostáticos en la planeación de la calidad del aire regional". Tesis profesional. ESIME. IPN. 1979.

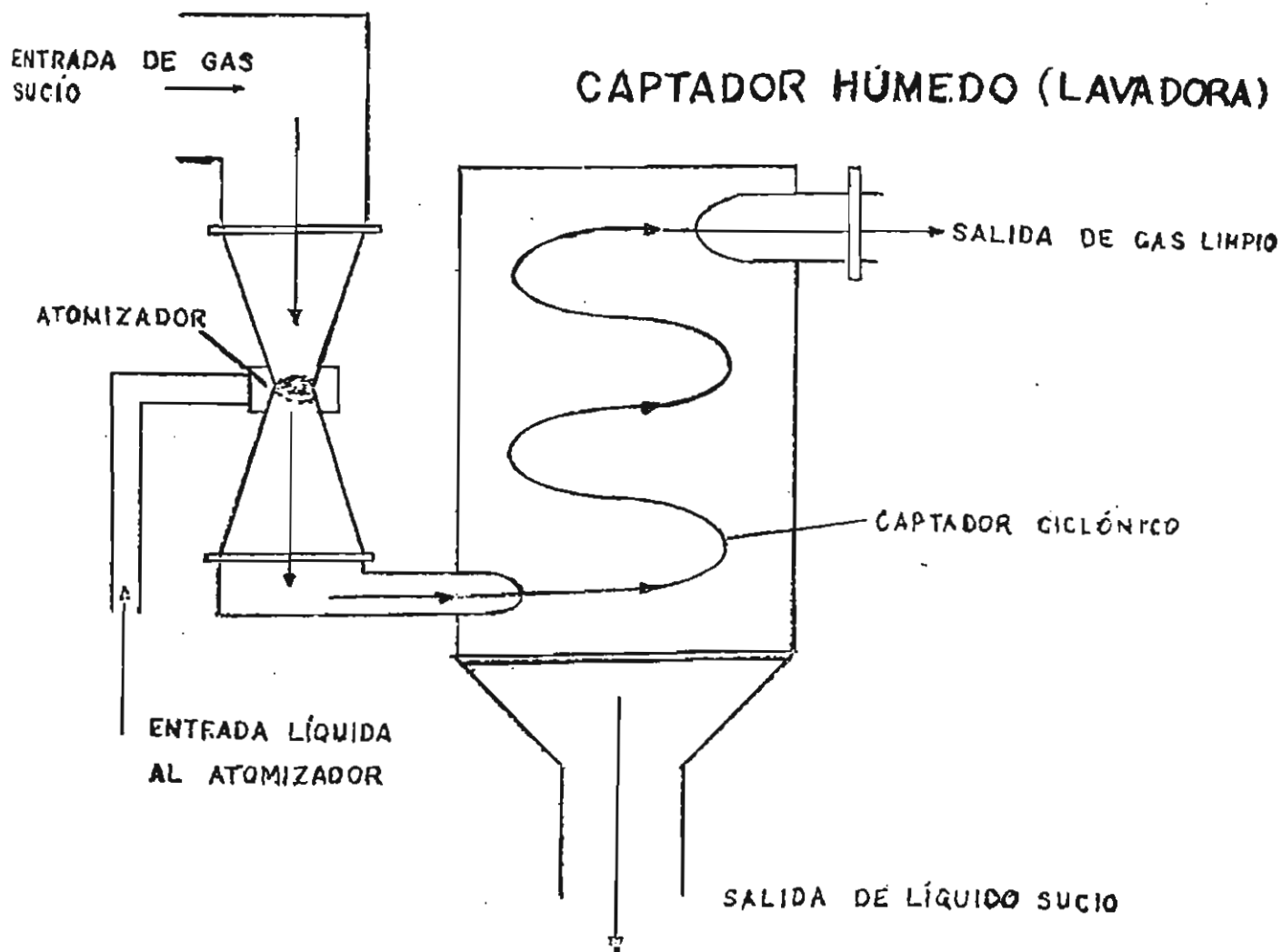
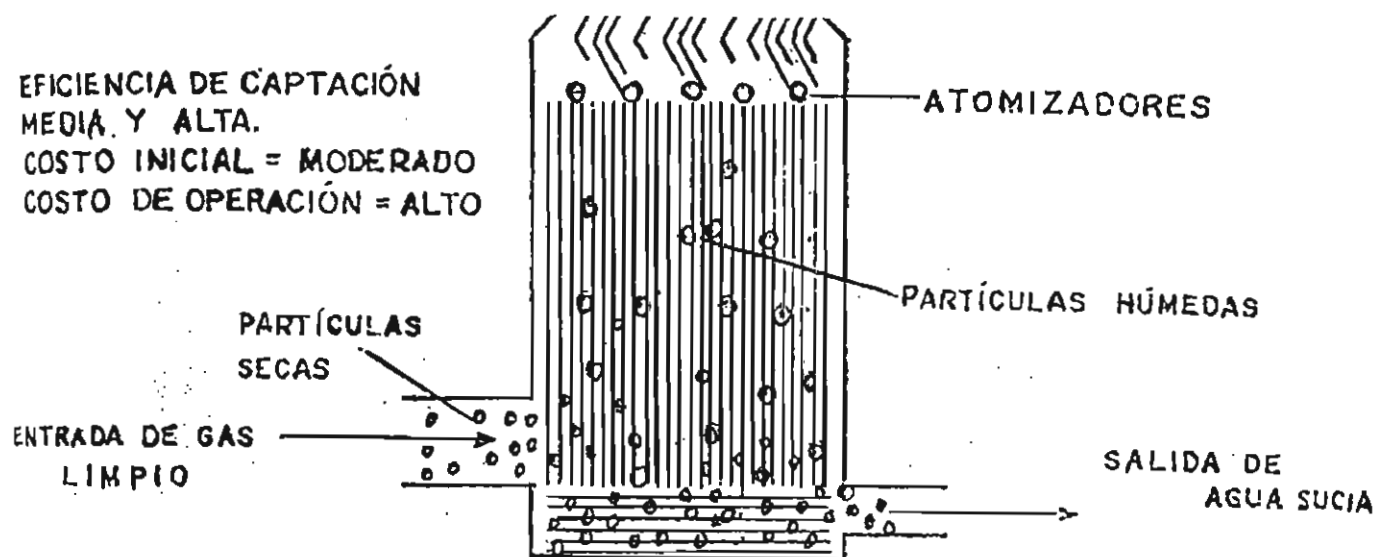
DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PRINCIPIO DE CONTROL DE UNA CÁMARA SEDIMENTADORA





CAPTADOR CICLÓNICO MOSTRANDO LOS PATRONES
HELICOIDALES DE FLUJO DEL GAS

EFICIENCIA DE CAPTACIÓN
MEDIA Y ALTA.
COSTO INICIAL = MODERADO
COSTO DE OPERACIÓN = ALTO



LAVADORA TIPO VENTURI

CÁMARA DE FILTROS TIPO SACO , CON DISPOSITIVO MECÁNICO DE VIBRACIÓN PARA SACUDIR Y CON INYECCIÓN DE FLUJO DE AIRE INVERSO PARA LIMPIAR LOS FILTROS ALTERNADAMENTE EN LOS LADOS DE LA CÁMARA

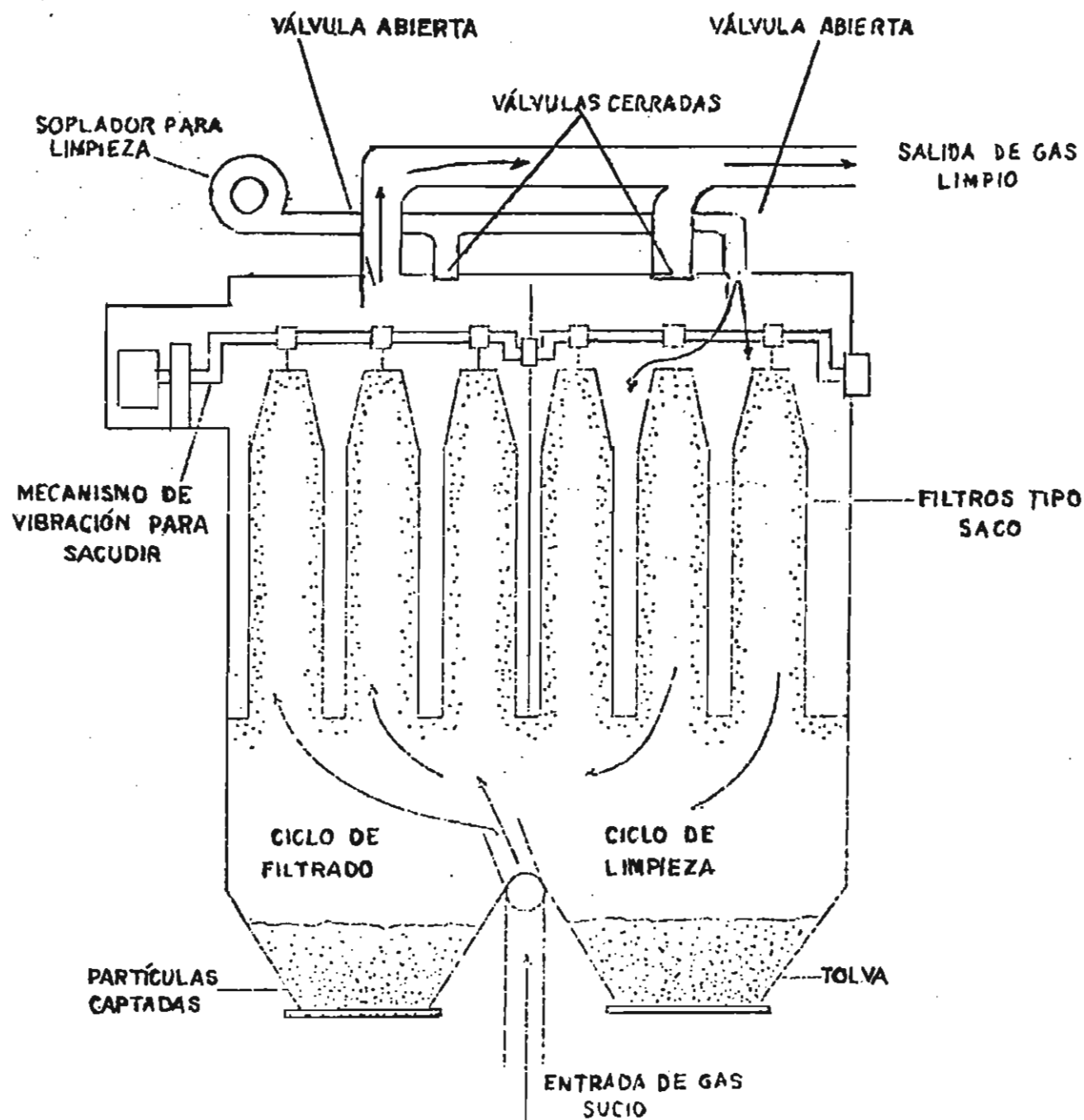
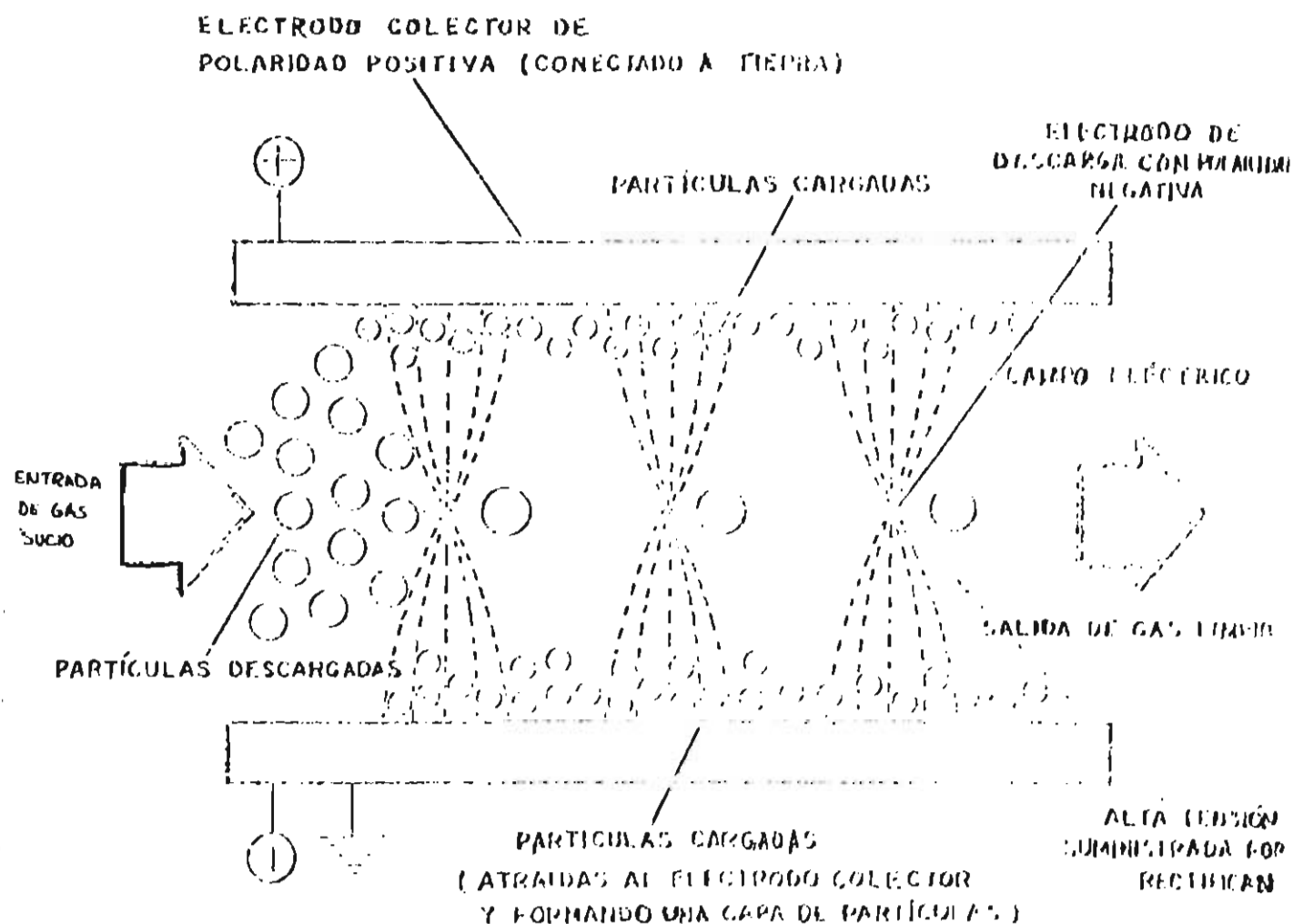


DIAGRAMA DEL PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE UN PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO



Bibliografía recomendada

Bethea R. "Air pollution control technology". Van nostrand U.S.A. 1978

Crawford M. "Air pollution control theory" Mc Graw-Hill U.S.A. 1976

Danielson John. "Air pollution engineering manual" 2a edition E.P.A. U.S.A. 1973.

Donovan R.P. "Fabric filtration for combustion sources". Marcel Dekker U.S.A 1985.

Hinds W. "Aerosol technology" John Wiley & Sons U.S.A. 1982

Jones H. R. "Fine dust and particulate removal" Noyes U.S.A. 1972

Licht W. "Air pollution control engineering". Basic calculations for particulate collection. Marcel dekker U.S.A. 1980.

Lloyd D.A. "Electrostatic Precipitator Handbook" Adam Hilger, Bristol U.K. 1988.

Parker Albert "Industrial air pollution handbook". Mc Graw-Hill U.S.A 1978.

Schiffftner K. Hesketh H. "Wet scrubbers. a practical handbook" Lewis Publishers Inc. U.S.A. 1986.

USEPA "Control of particulate emissions manual " Training course 413 E.P.A. U.S.A. 1973.

USEPA "Control techniques for particulate emissions form stationary sources" Vol.1. EPA-450/3-81-005a U.S.A. 1982.

Wark. K Warner C "Air pollution. Its origin and control" Harper & Row U.S.A 1981.

8. ANÁLISIS ECONÓMICO

La selección final de un equipo de control depende de muchos factores, entre los que destacan, el grado de control requerido, las características de las partículas y gas de arrastre y el costo, dado que sólo en contadas ocasiones la recuperación de productos valiosos o subproductos tendrán valor comercial, el costo del control incrementará el costo de producción y de servicios.

A los costos del control se deben añadir los del equipo auxiliar, los cuales pueden ser muy variables debido a las diferentes alternativas que pueden ser aplicables y que pueden usarse diferentes materiales de construcción con su efecto correspondiente en los costos.

Es necesario considerar también los costos asociados con la disposición del material colectado, los cuales pueden significar gastos importantes sobre todo en el caso de equipos húmedos en donde se remueven en forma de lodos y en donde se requiere considerar las instalaciones para tratar los lodos.

En cuanto a los costos asociados con el control se pueden identificar para fines de estimaciones preliminares los costos asociados con el capital es decir los costos con los requerimientos mínimos tales como el sitio en donde se construirá, así como su preparación e instalación y finalmente los costos de operación del equipo es decir la energía requerida y el mantenimiento.

Los equipos de control consisten para efectos de costos en:

- a. El equipo en sí mismo
- b. Los accesorios necesarios para su operación
 1. movimiento de aire
 2. movimientos de líquidos
 3. almacenamiento y disposición del material colectado
 4. construcción y soporte de las estructuras
 5. instrumentación y control

De acuerdo con lo anterior los costos pueden dividirse en:

- 1) Costos de capital
- 2) Costos de operación y mantenimiento

1) Costos de capital

Costos directos

Costo del equipo de control, generalmente el costo está asociado con el volumen del aire que maneja, hasta el punto en donde se obtienen costos marginales

Costo del equipo auxiliar

1. Equipo de movimiento de aire:
 - a) ventiladores y sopladores
 - b) sistemas eléctricos: motores arrancadores, conductos, interruptores etc.
 - c) ducteria, tubería, mamparas, deflectores etc.
2. Equipo de movimiento de líquidos (sistemas húmedos)
 - a) bombas
 - b) sistemas eléctricos: motores, arrancadores almbra, interruptores Etc.
 - c) tubería y válvulas
 - d) tanques de asentamiento
3. Almacenamiento y disposición de residuos
 - a) Tolvas
 - b) fosas de lodos
 - c) líneas de conducción
4. Construcción y soporte
 - a) acero estructural
 - b) cimentación, plataformas Etc.
 - c) aislamiento térmico
 - d) vibraciones y/o material resistente al desgaste por vibraciones
 - e) cubiertas protectoras
5. Instrumentación: medición y control de:
 - a) gasto de aire o líquidos
 - b) temperatura y presión
 - c) operación y la capacidad del equipo.
 - d) la potencia
 - e) la opacidad del gas a la salida

Costos de instalación

- a) costos del embarque del equipo y la forma como éste es enviado: completamente ensamblado, subensamblado o en partes
- b) costos asociados con la accesibilidad para la instalación, es decir, si es necesario remover o colocar en otra parte equipo existente o si se requiere instalar plataformas para servicio y mantenimiento
- c) servicios: es decir si se requiere instalar, o incrementar servicios en: energía eléctrica, agua, alcantarillado o vapor

Requerimientos especiales

- a) resistencia a la corrosión
- b) resistencia a la abrasión o a la intemperie
- c) temperaturas altas o bajas
- d) protección al clima: viento, inundaciones o temperaturas extremas
- e) pintura y protección anticorrosiva

2. Costos de Operación y mantenimiento

a) Servicios:

- energía eléctrica
- agua
- manejo de residuos
- vapor

b) Mantenimiento

- lubricación de partes móviles
- protección de superficies: limpieza y pintura
- reparaciones o reemplazos de partes o estructuras debido a fallas de bandas, filtros, bolsas, Etc. o por abrasión o corrosión

c) Mano de obra

- instalación
- operación
- mantenimiento

8.1 Métodos de estimación de costos de capital

Existen diversos métodos para estimar costos de capital, los cuales varían desde las estimaciones simples dependiendo del tipo de equipo y su capacidad hasta aquellos que requieren planos preliminares, especificaciones, balances de materia y energía Etc. y la selección del método dependerá de la información disponible.

Método de la estimación del orden de magnitud

Este método está basado en el costo promedio de; equipo para un tipo y capacidad particular, parámetros se determinan por el volumen de gas a tratar y la eficiencia de remoción deseada, estos costos pueden variar ampliamente por lo que el método es muy poco preciso.

Método de los factores

En este método se aplican factores a el costo de los componentes mayores del equipo de control, como un medio de estimar el costo, con información ganada a través de proyectos de control previos, que proporcionan los factores usados, este método utiliza curvas de costos contra gastos a ser tratados, para cada tipo de equipo de control y condiciones específicas.

La Agencia de Protección Ambiental ha desarrollado este tipo de curvas utilizando la metodología establecida por Lang, Chilton y Guthrie para estimar los costos de una planta química y la exactitud de este método depende de la similitud entre las condiciones del equipo seleccionado y las condiciones en las que será usado.

Este método no proporciona una exactitud mayor del 50% y si se requiere una mayor exactitud es necesario utilizar otros metodos más precisos como el de análisis de costos, dado que las curvas estiman costos brida a brida incluyendo controles y partes eléctricas, sin incluir el costo de la instrumentación, estas curvas se obtuvieron con numerosas simplificaciones y se presentan en la forma $y = ax^b$, basadas en análisis de regresión.

Las curvas también proporcionan costos anualizados sobre la base de 8700 hras/año, incluyendo costos de disposición de residuos no tóxicos sobre la base de 10 dolares la tonelada, costos de capital sobre una vida útil de 15 años y un costo de oportunidad del 15%.

Método de escalamiento

Cuando los costos de capital de un sistema de diseño similar pero de diferente capacidad están disponibles, se puede utilizar el sistema de escalamiento usando la siguiente ecuación:

$$E2 = E1 (r2/r1)^n$$

en donde:

E2 = costo del equipo deseado
E1 = costo del equipo conocido
r2 = capacidad del equipo deseado
r1 = capacidad del equipo conocido
n = relación exponencial

Esta ecuación especifica que si se gráfica en papel log-log la capacidad versus el costo, se debe obtener una línea recta con pendiente igual a n , la cual con relación al costo generalmente tiene el valor de 0.6 y es conocida como el factor de un sexto, con un uso muy limitado y una precisión mayor cuando se trata de un solo equipo que cuando se trata de un sistema de varios equipos, este método puede alcanzar una precisión del 20% si se cuenta con buena información.

8.3 Costos anualizados

Es importante considerar los costos de en base anual, los cuales deben de incluir los costos directos e indirectos:

costos directos:

- mano de obra
- materiales
- mantenimiento
- refacciones
- servicios
- disposición de residuos

costos indirectos:

- seguros
- cuerpo directivo (Staff)
- impuestos
- créditos
- recuperación de capital

Los costos anualizados directos se obtienen al aplicar, los costos unitarios de cada de los componentes enunciados a los requerimientos estimados en base anual de los mismos, los costos indirectos se obtienen al aplicar porcentajes a los costos directos y de capital, así como de la recuperación del capital el cual es función de las tasas de interés, vida útil del equipo y el valor de recuperación si existe.

Además de los costos descritos, hay que considerar algunos aspectos de incertidumbre que tienen efectos en los costos, tales como la inflación, el aumento en los salarios y costos de materiales y combustibles, así como en la vida útil esperada del equipo, lo cual requiere que se realicen ajustes.

8.4 ANÁLISIS DE COSTOS EN EQUIPOS DE CONTROL DE PARTÍCULAS

De acuerdo con lo descrito en los párrafos anteriores la estimación de los costos incluyen la estimación de los siguientes costos:

1. Costos de capital
2. Costos anualizados

Con respecto a el control de partículas existen tablas que relacionan porcentajes de los diferentes equipos y aun cuando estos pueden variar considerablemente, se pueden aplicar pensando que requieran ajustes en cada caso específico.

FACTORES PROMEDIO DE COSTOS PARA ESTIMAR LOS COSTOS DE CAPITAL

FACTORES DE COSTO	PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO	LAVADORES HÚMEDOS	FILTROS
COSTOS DIRECTOS			
costos de compra equipo			
equipo de control	0.82	0.82	0.82
instrumentación y control	0.10	0.10	0.10
impuestos	0.03	0.03	0.03
fletes	0.05	0.05	0.05
subtotal	1.00	1.00	1.00
costos directos de instalación			
cimentación	0.04	0.06	0.04
construcción	0.50	0.40	0.50
sistemas eléctricos	0.08	0.01	0.08
tubería	0.01	0.05	0.01
aislamiento	0.02	0.03	0.07
pintura	0.02	0.01	0.02
subtotal	1.67	1.56	1.72
costos indirectos			
ingeniería y supervisión	0.20	0.10	0.10
construcción y gastos de campo	0.20	0.10	0.20
costos de construcción	0.10	0.10	0.10
arranque	0.01	0.01	0.01
pruebas de funcionamiento	0.01	0.01	0.01
modelación	0.02	0.0	0.0
contingencias	0.03	0.03	0.03
total	2.24	1.91	2.17

Los costos anteriores se ajustan por factores que varían de 0.2 a 2, con variaciones mayores en los aspectos de ingeniería y supervisión en donde en el caso de nuevos procesos, prototipos o equipos grandes llega a valer hasta un factor de 3 y de igual manera en el caso de contingencias cuando es necesario garantizar una eficiencia deseada o bien especificaciones de operación el factor de ajuste variara de 5 a 10.

Los costos anualizados dependerán de las estimaciones de los diferentes conceptos en base anual en el caso de los costos directos y con respecto a los costos indirectos los siguientes valores pueden ser utilizados como una guía:

dirección	80% de la mano de obra de operación y mantenimiento
impuestos	1% de los costos de capital
seguros	1% de los costos de capital
administración	2% de los costos de capital
recuperación de costos	0.16275 en el caso de 10% de depreciación para una vida útil de 10 años

Las necesidades de mano de obra, mantenimiento y supervisión dependen de múltiples variables tales como: grado de automatización, continuidad de la operación, turnos de trabajo y otros.

los costos de mantenimiento dependen de variables del proceso como: corrosividad de los gases, abrasividad de las partículas, materiales de construcción, tamaño del equipo y tipo Etc.

Los requerimientos de energía se pueden calcular como:

ventiladores:

$$KWh = 8.3 Q (P) (SG) (h) / 10^4 \text{ eficiencia}$$

KWh = kilowatts-hora

Q = gasto, metros cúbicos / seg

P = caída de presión, pascales

h = horas de operación

SG = gravedad específica del gas

bombas:

$$KWh = 9.8 Q (H) (SG) (h) / \text{eficiencia}$$

H = cabeza del fluido, m

en ambos casos la eficiencia variara entre 60 y 70 %

finalmente los costos de recuperación de capital se obtienen con la siguiente ecuación:

$$CRC = \text{costos de capital} \times i(1+i)^n / (1+i)^n - 1$$

CRC = costos de recuperación de capital

i = tasa de interés anual

n = periodo de recuperación, años

Réferencias bibliograficas

EPA "Control techniques for particulate emissions from stationary sources" EPA-450 /3-81-005a U.S.A. 1982.

Neveril R.B. "Capital and operating costs of selected air pollution control systems". EPA-450/5-80-003, U.S.A. 1978.

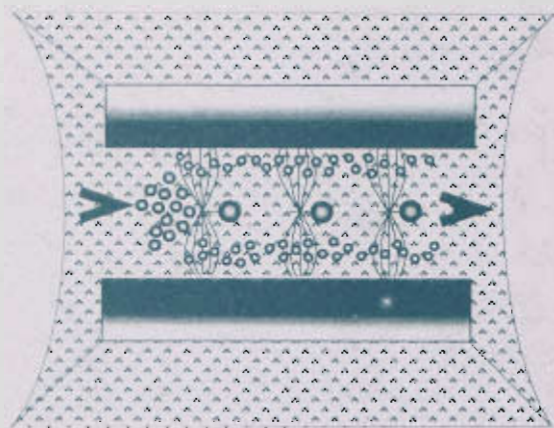
Control de partículas

Se terminó La edición estuvo
de imprimir a cargo
en el mes de junio de la Sección
del año 2002 de Producción
en los talleres y Distribución Editoriales
de la Sección
de Impresión Se imprimieron
y Reproducción de la 50 ejemplares
Universidad Autónoma Metropolitana, más sobrantes
Unidad Azcapotzalco para reposición.

2893953

UAM
QC793.2
E7.55

2893953
Espitia Cabrera, Alfonso
Control de particulas / A



0092101 04372



15.00 - \$ 15.00